



TITLE:

フレッシュコンクリートの動的性質に関する基礎的研究(
Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

角田, 忍

CITATION:

角田, 忍. フレッシュコンクリートの動的性質に関する基礎的研究. 京都大学, 1986, 工学博士

ISSUE DATE:

1986-01-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.r5804>

RIGHT:

新 制
工
653
京大附図

フレッシュコンクリートの動的性質 に関する基礎的研究

昭和60年10月

角 田 忍

フレッシュコンクリートの動的性質 に関する基礎的研究

昭和60年10月

角 田 忍

目 次

緒 論	1
序 論	1
本論文の概要	2
第1章 フレッシュコンクリートの動的性質に関する従来の研究	5
1・1 概 説	5
1・2 振動下におけるフレッシュコンクリートの性質	5
1・3 振動下におけるフレッシュコンクリートの性質の測定方法	9
1・4 フレッシュコンクリートの動的性質の経時的変化に関する従来の研究	11
1・5 結 論	14
参考文献	14
第2章 フレッシュコンクリートのせん断変形特性に関する研究	19
2・1 概 説	19
2・2 回転粘度計によるペーストおよびモルタルのせん断変形特性	20
2・2・1 はじめに	20
2・2・2 実験計画	21
2・2・3 実験結果および考察	22
(1) 内円筒の形状による影響	22
(2) せん断応力・せん断変形曲線	26
(3) せん断変形の経時変化	26
(4) 高性能減水剤を添加した場合のせん断変形特性	27
2・2・4 ま と め	31
2・3 フレッシュコンクリートのせん断変形特性	31
2・3・1 はじめに	31
2・3・2 実験計画	32
2・3・3 実験結果および考察	33
(1) ベーンせん断試験によるせん断応力・せん断変形曲線と配合の関係	33

(ii)

(2) 一面せん断試験によるせん断特性と配合の関係	35
2・3・4 ま と め	38
2・4 結 語	39
参考文献	40
 第3章 振動下におけるフレッシュコンクリートの動的挙動に関する研究	43
3・1 概 説	43
3・2 振動式回転粘度計による振動下の挙動	43
3・2・1 はじめに	43
3・2・2 振動式回転粘度計の理論	44
3・2・3 実験方法	46
3・2・4 実験結果および考察	47
(1) リサーチユ円	47
(2) 振幅及び端末効果の検討	50
(3) 動的レオロジー定数と周波数依存性	51
(4) 動的レオロジー定数の経時変化	55
3・2・5 ま と め	59
3・3 振動台による振動下の挙動	59
3・3・1 はじめに	59
3・3・2 共振法によるフレッシュコンクリートの振動	59
3・3・3 実験方法	61
3・3・4 実験結果および考察	62
(1) 共振曲線	62
(2) 共振点と加速度	64
(3) 配合と動的レオロジー定数との関係	65
3・3・5 ま と め	66
3・4 球引上げ型粘度計の適用	67
3・4・1 はじめに	67
3・4・2 球引上げ型粘度計の理論	68
3・4・3 実験方法	70

3・4・4 実験結果及び考察	72
(1) 繰り返し添加によるスランプの変化	72
(2) レオロジー的考察	74
3・4・5 ま と め	76
3・5 結 語	77
参考文献	78
 第4章 フレッシュコンクリートの縦波伝播特性に関する研究	 81
4・1 概 説	81
4・2 コンクリートの配合特性と縦波伝播速度	85
4・2・1 はじめに	85
4・2・2 実験方法	86
(1) 実験装置	86
(2) 縦波伝播速度の測定	88
(3) 使用材料	89
(4) 配合および測定条件	89
4・2・3 実験結果	90
(1) スランプと縦波伝播速度の関係	90
(2) 水セメント比と縦波伝播速度の関係	91
(3) 空気量と縦波伝播速度の関係	92
(4) セメントの種類と縦波伝播速度の関係	92
(5) 骨材量と縦波伝播速度の関係	93
4・2・4 配合と縦波伝播速度の関係式の検討	93
4・2・5 ま と め	109
4・3 レオロジーモデルによる縦波伝播特性の評価	110
4・3・1 はじめに	110
4・3・2 粘弾性体中を伝播する縦波の挙動	110
4・3・3 減衰係数	111
4・3・4 実験方法	113
(1) 実験装置	113

(2) 使用材料および配合	115
4・3・5 実験結果および考察	116
(1) ペーストの濃度とレオロジー定数	116
(2) モルタルの配合とレオロジー定数	117
(3) コンクリートの配合とレオロジー定数	117
(4) 振動時の動的レオロジー定数の測定	119
4・3・6 ま と め	124
4・4 結 語	124
参考文献	125
第5章 音波特性によるフレッシュコンクリートの物性の経時変化測定に関する研究	129
5・1 概 説	129
5・2 パルス波の伝播速度の経時変化	129
5・2・1 はじめに	129
5・2・2 実験方法	132
(1) 実験装置	132
(2) 使用材料	132
(3) 配合条件	133
(4) 実験手順	134
5・2・3 実験結果および考察	134
(1) ペースト、モルタルおよびコンクリートの縦波伝播速度の経時変化	134
(2) 横波伝播速度の経時変化	143
5・2・4 ま と め	146
5・3 動的レオロジー定数の経時的変化	146
5・3・1 はじめに	146
5・3・2 実験方法	147
5・3・3 実験結果および考察	148
(1) ペーストの周波数特性	148
(2) モルタルの周波数特性	152
(3) ペーストのずり弾性率および体積弾性率の経時変化	153

(4) モルタル, コンクリートのずり弾性率および体積弾性率の経時変化	155
5・3・4 ま と め	161
5・4 超音波パルス法による流動化モルタルの性質の経時的変化	161
5・4・1 はじめに	161
5・4・2 実験方法	162
(1) 実験装置	162
(2) 使用材料および配合	162
(3) 実験手順	162
(4) 解析方法	163
5・4・3 実験結果および考察	164
(1) 伝播速度のおよぼす添加量の影響	164
(2) 速度増加変化率	166
(3) ずり弾性率, 体積弾性率の増加変化率	167
(4) ずり粘性率の経時変化	170
(5) 圧縮強度と伝播速度, 体積弾性率の関係	172
5・4・4 ま と め	175
5・5 結語	176
参考文献	177
第6章 結 論	181
謝 辞	185

緒

論

緒 論

序 論

ポルトランドセメントが発明されてから僅か160年余りの間に、コンクリートは建設用構造物材料として急速な発展をとげてきた。この間、ポルトランドセメントについては種々の改良が加えられてきたが、コンクリートに要求される性能が多様化するにつれて、セメントも多種多様のものが開発され改良されてきた。コンクリートは一種の複合材料であるが、マトリックスであるペーストが混和剤によって改良されるのと同様に、ディスパージョンである骨材も天然のものから人工のもの、更には繊維の混入といった具合に、セメント・水・骨材以外の第4・第5の材料を混入する機会も多くなってきている。一方、構造形態もプレストレストコンクリートの開発が構造物の長大化、薄肉軽量化への移行を速めている。

近年、コンクリート技術の急速な進歩に合わせて、施工技術も著しく変化し省力化への道を歩んでいる。これと併行してコンクリート品質への要求も多様化してコンクリート品質の管理範囲が広がり、品質を把握する技術もこれらの要求に答えられる測定技術なり判定技術が必要となってきた。特に施工時における作業性、いわゆるワーカビリティの判定方法と、コンクリートの欠点でもある硬化まで時間がかかるため硬化後の品質を出来るかぎり早く知りたいというコンクリート品質の早期判定法はまだ十分確立されておらず、早急な解決が望まれているところである。

現在、我国におけるコンクリート施工時の品質判定は、コンクリートが所定のワーカビリティを有しているかどうかということが基準とされている。このワーカビリティという用語は各学会によって意味は多少違っているが、土木学会「コンクリート標準示方書」によると「コンシステンシーによる打込みやすさの程度および材料分離に抵抗する程度を示す、まだ固まらないコンクリートの性質をいう。」とされている。従って、一般にはコンシステンシーを測ることによってワーカビリティを推定する方法がとられている。このように、ワーカビリティが定量的に捕えるというより定性的に扱われる部分が多く、あいまいさを残している間はコンクリート技術の更なる発展が阻害されるといっても過言ではない。最近、各国においてフレッシュコンクリートのワーカビリティを定量的に表現しようという研究が多くなされるようになってきたが、その主流をなしているのはフレッシュコンクリートの性質が流動と変形に関することからレオロジー学的な扱いをされていることである。国際的には1973年英国リーズ大学における「フレッシュコンクリートにおける重要な特性とその測定法」に関するRILEMセミナーが開催され、多くの論文が発表された。特に、フレッシュコンクリートの特性をレオロジーによって定量化を計ったものが大勢を占めたのがきっかけとなり、我国でも昭和57年6月に土木学会内にコンクリート施工研究小委員会が発足し、フレッシュコンクリートの特性の数量化およびフレッシュコンクリートの挙動の理論化、体系化が進められるようになった。

土木構造物の設計において、コンクリートはその材料特性の中でも特に応力・ひずみ関係と強度特性に重点が置かれるのが普通である。これは硬化コンクリートの静的な特性を主に考えたも

のである。しかし、近年交通事状の変化、海洋構造物への進出、断面の薄少傾向などから繰り返し荷重による疲労や衝撃などの動的問題について検討を行うことが多くなりつつある。一方施工計画においては、練り混ぜ、運搬、打設といった作業中に受ける外力に対して、フレッシュコンクリートの荷重・変形関係、強度特性以外に流動性が検討されるし、力学特性以外に密度や均一性といった物理的性質が検討される。また、動的な問題としては振動による締固め性に重点が置かれている。十分に締固められた密実なコンクリートが良いコンクリートの条件の一つであることから、振動締固めに関する研究も多く、ある程度工学的に明らかにされている点もあるが、振動・波動・衝撃といった動的な外力に対するコンクリートの挙動について、物理的意味のある数値により表現するといった基礎的な部分について不明な点が多い。例えば簡単な例として、型枠に打設されたコンクリートを木のハンマーで型枠をたたくことによって気泡を追出し、締固め効果を上げる作業や棒で突いたりする作業などは波動や振動を利用している訳であるが、フレッシュコンクリートを伝播する弾性波動についてはほとんど解明されていない問題である。

本研究は、コンクリート施工の合理化を促進するための条件の一つである、フレッシュコンクリートの振動下での挙動を明らかにするための基礎的資料を得ることと、練り混ぜ時に有していたコンクリートの動的パラメータが経時的にどのように変化していくのかを明らかにし、品質の早期判定に関する基礎資料を得ることを目的とし、レオロジー的な評価方法の有効性について検討する。

本論文の概要

本論文はフレッシュコンクリートの性質で動的性質の測定方法とフレッシュコンクリートの動的性質に影響する配合要因とこれらの性質の経時的変化について論じたものであり6章から構成されている。

まず第1章では、フレッシュコンクリートの動的性質に関する在来の研究の概要を述べたもので、フレッシュコンクリートのワーカビリティを物理量として表現しようとする研究の中で、特に著者の研究と関係すると思われる動的測定法に関するものについて概説し、またこれらの性質の経時的変化に関する論文の概説も行う。

第2章では、フレッシュコンクリートの静的なせん断変形特性について検討した研究について述べる。すなわち、フレッシュコンクリートのせん断に対する荷重・変形特性および強度特性といった変形速度の遅い場合の力学特性について配合要因との関係を明らかにし、動的性質を検討する基礎資料とした。

第3章では、フレッシュコンクリートを正弦振動させた場合の挙動について、粘弾性的に評価しようとするもので、第2章における結果を基とし、コンクリートの構造を破壊しない程度のひずみ振幅で振動させた場合と、それ以上のひずみ振幅により振動させる場合と2通りの問題について検討し、振動締固め特性への基礎資料を得るとともに変形速度の速い、微小変形であるが載荷時間の短い場合のフレッシュコンクリートの挙動について述べる。

第4章では、フレッシュコンクリートの中を伝播する弾性波の伝播特性によってフレッシュコンクリートのワーカビリティや配合要因と関連づけようとするものである。すなわち、コンクリートのスランプや空気量を変化させた場合の縦波伝播速度への影響や水セメント比、セメントの種類、骨材量を変化させた場合の縦波伝播速度への影響を調べ、またレオロジー定数での考察も加える。

第5章では、型枠に静置されたフレッシュコンクリートの性質が経時的にどの様に変化していくかを、コンクリートに攪拌など与えることなしに、動的パラメーターを用いることによって非破壊的に観察し、配合要因と凝結硬化過程との関係を調べる。すなわち、凝結硬化過程の違いが硬化コンクリートの力学的性質に及ぼす影響を調べ、品質の早期判定への足がかりとする。

第6章では第2章から第5章までで得られた結果を総括するとともに、今後の問題点について述べ、本論文の結論とする。

第 1 章 フレッシュコンクリートの 動的性質に関する従来の研究

第1章 フレッシュコンクリートの動的性質に関する従来の研究

1・1 概 説

コンクリートは気泡、水、セメント、骨材といったそれぞれ気体、液体、固体といったまったく性質の違うものが、混り合った複合材料であるが、セメントが水と接することにより水硬性を発揮し、セメント硬化体が骨材粒子を固結して強度を徐々に発現し、構造材料として実用に供されるようになる。したがって、コンクリートが実用に供されるまでには時間的経過が必要であり、強度発現までに受ける各種の応力履歴は硬化コンクリートの品質に及ぼす影響は少くないと考えられる。材料の品質や配合、練混ぜ条件が同一であるコンクリートがミキサーから排出され、同一の性質を有していたコンクリートでも運搬や打設、締固め、仕上げの条件や養生条件の相違によって相当変化するものと考えられる。

硬化後のコンクリート品質に影響を及ぼす内的要因は材料の品質や配合が主であるが、外的要因となると外力の種類や大きさ、乾湿、凍結融解など多くの要因が考えられる。特にフレッシュコンクリートを締固める際に行われる振動締固め作業は連続的に繰返し外力を加えることであり、ペーストマトリックスの粘度を適度に下げ、気泡を振動させ上部へ追い出し、なおかつ粗骨材のような大きな粒子の沈降を出来るだけ少く抑え、全体の均一性を保つことで硬化後のコンクリート品質を向上させるものである。また、振動締固めでもパルス振動にした方が締固め効果が良いという研究¹⁾もあり、また表面仕上げを振動によって少ない仕事量で作業が行われている²⁾。更に、コンクリート内部組成を知る目的で構造破壊しない程度の微振動が用いられたり、超音波パルスの伝播速度から凝結時間を推定する試み³⁾が行われている⁴⁾。

以上のように、フレッシュコンクリートの品質改良や、品質判定への動的な外力の利用が行われている。しかし、振動締固めへの応用は多くなされているが、その他への応用はまだ十分とは言えず研究例も少ない。

従って、本章ではフレッシュコンクリートの性質をミキサーなどの攪拌による比較的遅いせん断速度に関する問題に対して、例えば振動締固めのように速いせん断速度が与えられる内容を動的問題として定義し、動的な外力に対するコンクリートの性質に関する既往の研究をまとめ、本論文の内容に係るフレッシュコンクリートの動的性質の測定方法、配合要因などとの関連について検討する。

1・2 振動下におけるフレッシュコンクリートの性質

良質なコンクリートを得る条件として米国開拓局のコンクリートマニュアルによると、耐久性・強度・経済性の3つの条件を同時に満足することであると述べられている。これらの条件には数多くの検討項目が書かれているが、必ず含まれている項目にワーカブルな配合というのがある。練り混ぜから仕上げまでの工程でコンクリートがワーカブルであるということが硬化後のコンク

リートの性質に良好な影響を与えるということである。ワーカブルな配合、すなわち良好なワーカビリティを有する配合とはどのような配合であるかということになる。このワーカビリティという用語の意味であるが各学協会、研究者によって多少意味が違っている部分があるものの、大別してフレッシュコンクリートの性質、例えば可動性や締固め性といった性質で定義する⁵⁾⁻⁸⁾か、施工条件や作業性を含めて定義するかの2とおりに分類できる。ワーカビリティ (Workability) という用語の本来の意味から考えると「作業性の難易」ということになるが、例えば同一配合のコンクリートであっても形状・寸法、鉄筋量、温度といった施工条件によってワーカビリティの評価が変わってくる。またワーカブルでないと判断されるコンクリートでも振動を加えてやることによりワーカブルになることもある。このようにコンクリートが有する性質が施工条件によって評価が違ってくる結果が出てくることで曖昧さを残すことになっている。したがって、施工条件に関係なく、コンクリートの物理的性質のみによって、ワーカビリティを評価すべきであるという意見は多い¹⁶⁾⁻¹⁸⁾。このような考えからフレッシュコンクリートの性質を物理量により評価しようとするのが前者であり、やはり作業性の難易を考慮に入れるべきであるとするのが後者である。しかし、フレッシュコンクリートの性質が物理量により評価することができれば、特定の施工条件における作業性は将来において解析は可能であり定性的に扱われていたワーカビリティという用語を定量的に評価できると考えられる。

Ritche¹⁹⁾はフレッシュコンクリートの性質をレオロジーにより評価しようとして図1・1のような分類を行った。彼はコンクリートのワーカビリティを構成するのは安定性、締固め性、可動

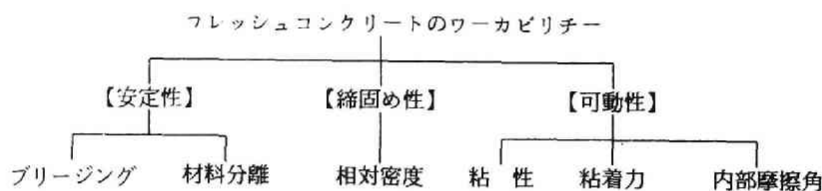


図 1.1 Ritche¹⁹⁾によるフレッシュコンクリートのワーカビリティの概念

動性の三つであり、これら三つの性質をレオロジー的に評価することができるとしている。安定性はブリージングや材料分離によって測られる外力なしのフレッシュコンクリートの流動と定義され、締固め性はフレッシュコンクリートのエントラップトエアを追い出し易く材料分離を避けられる範囲での締固め易さであり、可動性は特にレオロジーで表現しやすい性質であるがせん断に対する粘性、凝集力、内部抵抗によって表わされる。彼はこれらの性質、項目を独立したものと考えているが、実際には相互に関係している。すなわち粘性や凝集力、内部摩擦角はブリージングや分離の程度を左右するものであり、振動を受けることによりマトリックスの粘性が低下し、凝集力や内部摩擦も一時的に低下することからブリージング、分離を促進するほか締固め性に影響を及ぼす。従って、粘性や凝集力、せん断による内部抵抗をワーカビリティに関する物性値に診たてて数値化することはワーカビリティの定量化を一步進めることにつながる。Bache²⁰⁾は振動締固め時における応力と、レオロジーの関係について次のように述べている。流動は摩擦力、粘着力、粘性によって影響され、粘着力はせん断抵抗がマトリックスの粘性流動に起因している間

は骨材粒子間の表面引力によって増加するし、降伏値以下のせん断応力では流動は起らずコンクリートは固体のように挙動する。しかし高い振動を与えると粘性が低下し流動を開始する。このように配合によってペーストの粘性を低下させるのと同様に振動によって粘性を低下させるのが可能である。フレッシュコンクリート中に伝播する運動量に影響する因子は弾性係数、粘着力、摩擦、粘性、密度、減衰および音速であるとしている。コンクリートの締固め時におけるレオロジー的性質を知ることは現場における施工性および硬化後のコンクリートの品質を保障する配合を決定する上で非常に有益である。しかし、現在のところ研究室においても現場においても簡便に振動時におけるレオロジーに関する情報を与えてくれる試験方法は確立されていない。

フレッシュコンクリートの振動締固めの原理は粒状物質の粒子に振動を与えて運動させ粒子間の内部摩擦を低減、抹消し流動させることにある。L'HermiteとTournon²¹⁾の研究によると、静止状態にあるコンクリートに比べて内部摩擦が約 $1/20$ に低減することが実験的に示されている。このことは砂地盤における動的せん断（繰返し荷重）による液状化現象と類似している。即ち、非排水状態で繰返し変形を与えると負のダイラタンシーによって、特にせん断方向が何回も逆転すると、過剰間隙水圧が累積し、有効応力がゼロへと漸近するために液状化する。この際初期有効鉛直応力 σ_{vo}' が小さい程、また応力振幅 τ_d が大きい程、有効応力ゼロの状態になり易く、液状化の難易を表わす指標として応力比 τ_d / σ_{vo}' が用いられている。^{22) - 24)} Forssblad²⁵⁾ は潤った土の効果的な振動締固めには動的圧力 $0.05 \sim 0.1 \text{ MPa}$ が適しているとしており、この動的圧力が粒子間の毛細管力を起えるために必要な圧力であり、同様のことが硬練りコンクリートにも言えるとしている。

岩崎²⁶⁾はコンクリートの液状化は接触している固体粒子が別々に運動することによって起こるから、粒子間の相対変位が大きい程、また単位時間に起こる運動の回数が多い程液状化しやすいとしている。即ち、振動の液状化作用は変位勾配と振動数に比例すると述べており、液状化作用 L は次式に関係するとしている。

$$L \propto \frac{\alpha_{max}}{2\pi c} \quad (1.1)$$

ここで α_{max} : 最大加速度, c : 波速である。

Kirkham²⁷⁾らはフレッシュコンクリート中へのエネルギーの伝播も重要な因子であるとして次式を提案しとしている。

$$W = k_1 m a^2 f^3 t \quad (1.2)$$

ここで W : エネルギー, k_1 : コンクリートの硬さと減衰によって決まる定数

m : コンクリート重量, a : 振幅, f : 振動数, t : 時間である。

(1.1) (1.2) 式からもわかるように振動締固め効果を上げるには加速度 $\alpha = 4\pi^2 a f^2$ を上げてやるのが効果的である。しかし、単に加速度を上げてやっても振動機とコンクリートとの見掛けの接触と、実際に振動機からコンクリートへ振動エネルギーを伝達し得る物理的な接触とは必ずしも一致せず、主として振幅と配合によって異なるという指摘もある。²⁸⁾

(1.1) においてフレッシュコンクリート中を伝播する弾性波速度も締固め効果に影響する

ことが示された。また、波速は内部振動機の有効範囲や表面振動機の影響深さを知る上で重要な因子である。弾性媒体中を伝播する正弦圧縮波は振幅が a_0 である地点から x の距離における振幅 a_x は減衰率 α として

$$a_x = a_0 \exp(-\alpha x) \quad (1 \cdot 3)$$

求まる。この正弦圧縮波による最大圧力 P は粒子の最大速度 V 、波速 c 、密度 ρ とすると

$$P = V c \rho \quad (1 \cdot 4)$$

となる。ここで c は次式により求まる。

$$c = f \lambda = (E/\rho)^{1/2} \quad (1 \cdot 5)$$

ここで λ は波長、 E は弾性係数である。

岩崎²⁹⁾は c を流体中を伝わる弾性波と同様であるとして、空隙率が A であるコンクリートの弾性率 $K = K_a/A$ として次式を提案している。

$$c = \sqrt{\frac{1}{A(1-A)} \cdot \frac{K_a}{\rho_0}} \quad (1 \cdot 6)$$

ここで K_a は空気の体積弾性率、 ρ_0 は空隙のないコンクリートの密度である。

上式からは、振動により粘性が低下し、骨材の再配列が進行するにつれて空気は上方へ追いやられる結果、 A が低下し、 c は空隙率が50%までは空隙が多い程小さくコンクリート密度が大きい程小さいことから (1・1) 式において空隙の多いコンクリート程締固まりやすく、締固まるにつれて締固め進行速度が低下すると述べている。

弾性波速度はHalken³⁰⁾によると振動開始時において45 m/secで1～2分後には60m/secから250m/secになるとされている。またフレッシュコンクリートの動弾性係数としては実験的に3 MPa (2.94×10^7 dyn/cm²) を得ている。

フレッシュコンクリートの性質は注水後の経過時間や温度によって変化する。フレッシュコンクリートがセメントペーストと気泡からなる変形性のマトリックスと剛体に近い骨材粒子が分散している状態であるから土に似た性質を有していることは前に述べた。Alexandridis³¹⁾らによるとコンクリートは骨材およびセメント粒子間の摩擦抵抗とかみ合いによるせん断強度とセメントの水和による骨材間の付着によるせん断強度をもっており、前者を内部摩擦角、後者を粘着力として、真の粘着力はセメントの水和の結果生じるとしている。また三軸試験の結果から、注水後の経過時間または温度が変化した場合、内部摩擦角は本質的に一定であってコンクリートのせん断強度が時間とともに増加するのは水和の進行によって粘着力が増加するためであると述べている。フレッシュコンクリートは粘性とかなりのせん断強度を有しているが、このせん断強度が経時的に変化すれば今まで述べてきた動的な性質にも当然のことであるが影響を与える。

1・3 振動下におけるフレッシュコンクリートの性質の測定方法

振動機によって振動させられているフレッシュコンクリートは内部摩擦力が低減させられ、流動状態を示す。この状態における流動特性を何らかの方法で測定できれば、振動締固めに要する最小仕事量を決定するための重要な情報となる。即ち各種配合のコンクリートの振動締固め時の合理的な振動パラメータを設定する一助となる。

このような目的から考察された測定方法の大半は、容器内にコンクリートを入れ、容器を振動させ流動状態でのコンクリート試料中に設置されたベーンのような回転体を回転させて回転体に発生するトルクから内部摩擦力の変化を数量化しようとするものと、球体を落下または引上げることによって球体に発生する抗力から内部摩擦力を数量化する形式のものか、あるいは一定量のコンクリートに一定条件の振動エネルギーを与え、所定の状態に変形あるいは流動するまでの時間などによって相対比較するものである。

回転体を回転させる形式のものにはBache³²⁾、Legrand³³⁾、Bergström³⁴⁾、Tattersall³⁵⁾らの測定方法がある。Bacheは150Hzで振動台を振動させ、加速度を10gから50gまで変化させた場合のみかけ粘度が加速度の増加によって低下する傾向を示した。Legrandはモルタル中の骨材粒子が角ばっておれば、定常流動においてビンガム流動を示していても振動下においては骨材の容積率が0.595以下であれば擬塑性流動(pseudo-plastic flow)をし、0.622以上であればダイラタント流動を呈し、またその中間は不安定な状態になると述べている。一方、骨材粒子が球形であれば容積率が0.595以下では振動によってニュートン流動を示すがそれ以上では変化しないという結果を得ており、これらから粒子の充填状態がフレッシュコンクリートの流動特性に影響すると述べている。Bergströmは振動中のコンクリート内で回転翼を自由減衰振動させ、その対数減衰率の逆数を変形性能(deformability)という相対的な値で示すことで、締固め時間の経過に伴うフレッシュコンクリートの品質変化とコンクリート品質との関係を検討している。彼はコンクリートの変形性能が図1・2のように3種類に分類することができると述べている。Tattersallは

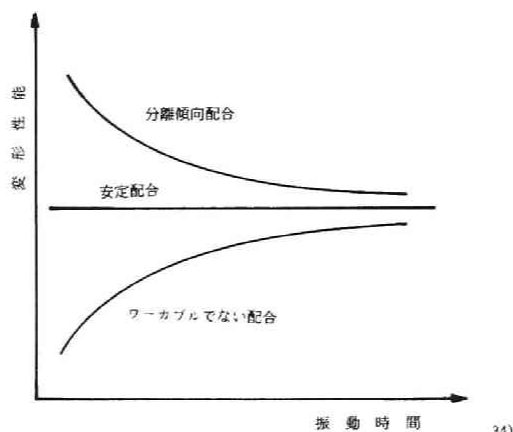


図 1.2 コンクリートの変形性能曲線の特徴 (Bergström³⁴⁾)

二点ワーカビリティ測定法 (Two-point workability test) という回転体の翼の部分コンクリートのワーカビリティによって数種類の形状のものに換え、回転体の回転数を何段階かに切換えその時のトルクと回転数から流動曲線を書くことでワーカビリティを判定する方法を開発したが、この方法において容器を振動させ振動下のコンクリートについても実験を行っている。その結果は振動させないコンクリートはビンガム流動をするのに対し振動下では降伏値が消失または減少し凝塑性流動をすると述べている。

次に球体を引き上げる方法は最初L'Hermite³⁶⁾らによって考案された。この方法は振動下におけるコンクリートをニュートン体と仮定し、試料中を移動する球の受ける抗力がStokesの法則に従うものとして球速と抗力³⁶⁾の関係からコンクリートの粘度を求めるもので、彼はセメント骨材比を一定とし、振動条件を3000r.p.m、振幅1mmとした場合のセメント水容積比と粘度の関係を図1・3のように表わした。しかしDesov³⁷⁾は同様の装置を改良して振動数および振幅も変化させたところ、図1・4のように振幅によってみかけ粘度が低下することを示し、チクソトロピー

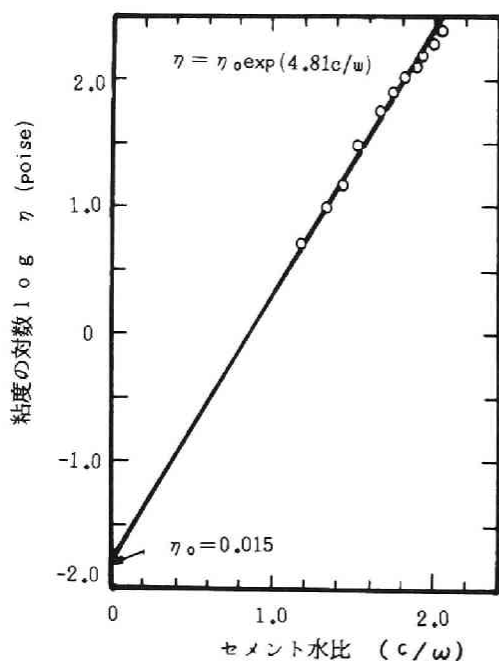


図 1.3 コンクリートのセメント水比と粘度の関係
[1 : 6.2配合, M. S=2.5cm, f=3000rpm, 振幅1mm]
(L'Hermiteらによる)²¹⁾

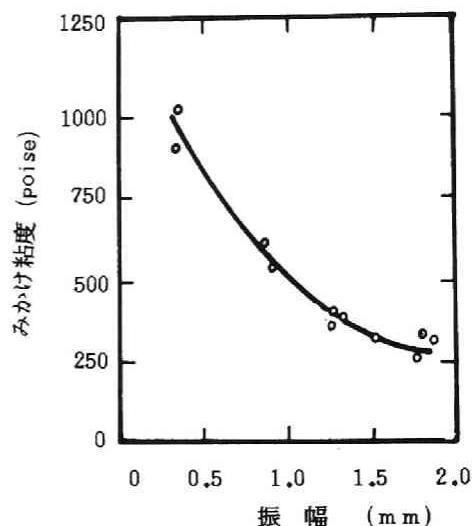


図 1.4 振動振幅とモルタルのみかけ粘度の関係³⁷⁾
[1 : 2モルタル, w/c=0.40] (Desovによる)

の影響を考慮する必要性を指摘した。明石³⁸⁾らは振動数および加速度と粘度との関係を同様の装置により実験した結果、粘度の低下が加速度に負うところが大きくまた振動下のコンクリートの粘度が流動状態にあるモルタルの粘度に負うところが大きいと述べている。このような測定方法を用いた例としては明石³⁹⁾ら西林⁴⁰⁾ら松藤⁴¹⁾らの研究がある。

次に所定の条件のもとで相対比較をするという方法であるが、Vee-Bee試験やV. F試験などがこれに相当するものである。Vee-Bee試験はPowersの開発したレモルジング試験を改良したもので、振動条件は3000~3500r.p.m振幅1~5mm、加速度3~4gのものが振動下の

コンクリートの流動性を良く再現することができ、コンシステンシーに対する反応も敏感である。VF試験 (vibration flow test)⁴²⁾はPC用のコンクリートのコンシステンシーを試験する目的で我国で考案され土木学会規準に採用されている。この方法は棒状振動機 (8000r.p.mを標準とする)を振動台に取り付け、中央に置かれた試料円筒の流出孔から振動によって流動したコンクリートが流出し、隔壁で仕切られた4室への流出状況を観察し、円筒内でのコンクリートの下がり VF値として評価するもので、振動による流動性能も目視することができる。

これらの方法からは物理量としての数値を得ることは出来ないがコンクリートの振動による流動性能は評価することができる。

1・4 フレッシュコンクリートの動的性質の経時的変化に関する従来の研究

コンクリートが型枠内に打込まれて、締固めが終るとセメント・骨材といった固体粒子が沈降を始め、それにとまってブリージングが起り、またセメントの水和によって間隙が埋められ粘性が増加し弾性、強度も発現してくる。このようにコンクリートが静置され、半固体状のものが固体へと変化して行く過程は凝結硬化過程と呼ばれている。この凝結と硬化はコンクリートに関しては明確な定義はないが、セメントペーストに関して述べると時間の経過とともにしだいに流動性を失って固体に移行する過程を凝結、固体化した後での強度の増進過程を硬化と呼んでいる。⁴³⁾従ってコンクリートの性質が急激に変化するのはこの凝結の時期と硬化初期の時期で、これらの期間を初期材齢 (early age)⁴⁴⁾と呼んでいる。本章では主としてフレッシュコンクリートの対象と考えられる範囲の凝結性状について取上げることとし、硬化初期の性状については本論文に關係するものに限定する。

この初期材齢時に関係する問題としては、施工上の各種作業開始時期の決定とその要領、不慮の外力や環境条件の変化などへの対応が考えられる。前者には表面仕上げ開始時期、打ち継ぎ許容時間、再振動限界、移動型枠の移動時期などがあり後者には地震、型枠の移動、交通振動、温度応力などが考えられる。また凝結調整剤の性能判定といった混和剤の効果なども含まれる。

コンクリートの凝結性状を知るために現在最も多く利用されている方法はプロクター貫入抵抗試験 (ASTM C-403)⁴⁵⁾であろう。この方法はTuthillらによって土の貫入抵抗試験装置をコンクリートに応用したものであるが、ウェットスクリーニングしたモルタルの貫入抵抗値が500psi (35kg/cm²)⁴⁶⁾に達した時間を振動限界とした。烏田はこの貫入抵抗値と打ち継ぎ許容時間とを関連させて、打放しや重要な部材の場合で1kg/cm²、一般の部材の場合で5kg/cm²、内部振動など適当な処置をする場合で10kg/cm²であるとした。しかし凝結遅延剤を用いた場合には内部振動などによる処置をしても1.4kg/cm²であるという報告もある。⁴⁷⁾ここで再振動によって好結果が期待できるのは配合が適当な場合で、凝結遅延剤を使用しないなら4時間位までであることに注意しておく必要はある。⁴⁸⁾

上記以外の方法としてピン引抜き抵抗試験^{49) 50)}、音速による方法⁵¹⁾、電気抵抗による方法⁵²⁾、振動エネルギー吸収法⁵³⁾、微小振動法⁵⁴⁾などがある。ピン引抜き抵抗試験はコンクリート中に埋め込んだステンレス棒を順次引抜き、引抜き抵抗より凝結を判定するものであるが付着強度の経時的変化を調べ

ていることになる。

これに対して音速による方法、電気抵抗法、振動エネルギー吸収法はコンクリートの内部組成を直接測ることになるのでフレッシュコンクリートの性質の経時変化を知る上で重要である。この内、電気抵抗法はコンクリート中に電流を流し、その抵抗の変化から凝結を判定するものであるが再現性に乏しいなど問題は多い。振動エネルギー吸収法は、一定の振動をコンクリート中に発振し、その振幅の変化から凝結を判定しようとするものであるが、振動数が変れば受振振幅の特性も変わることからやはり再現性に問題がある。これに対して音波による方法は弾性波の伝播速度の変化を指標とするものであるからコンクリートの動弾性係数、密度、ポアソン比⁵⁵⁾に関係しておりコンクリート物性の変化を間接的に表わしている。この考えからWhitehurstは超音波の伝播速度の経時変化を測定し、速度増加率が急激に低下する時間を凝結時間としたが、凝結速度の遅い場合には明瞭な変化点は表われないとかそのような明瞭な点は存在しない⁵⁶⁾ とい⁵⁷⁾ 意見⁵⁸⁾ も多い。また、この時期の圧縮強度は $3 \sim 6 \text{ kg/cm}^2$ 範囲にあり、セメントペーストのピカー針による終結時間より多少遅れるという報告がある⁵⁹⁾。この時期におけるコンクリートの圧縮強度は材齢2～4時間程度から発現し始め、圧縮強度が 10 kg/cm^2 程度までは強度の増加割合も増す。材齢と圧縮強度の間には次式のように指数関係があるといわれている⁶⁰⁾。

$$f_{cc} = a H^b \quad (1 \cdot 7)$$

ここで f_{cc} : 圧縮強度, H : 材齢(時間), a, b ; 実験定数

また、これにマチュリティーを考慮することで温度の影響を取除くことは可能である⁶¹⁾。圧縮⁶²⁾ 強度と伝播速度の関係に関しては、圧縮強度が $0.5 \sim 5 \text{ kn/cm}$ の範囲では音速と圧縮強度の対数⁶³⁾ が直線関係にあるという報告がある。しかし図1・5のように、1969年にRILEMでまとめた⁶⁴⁾ パルス速度と圧強度の関係を見てもわかるように非常に複雑である。

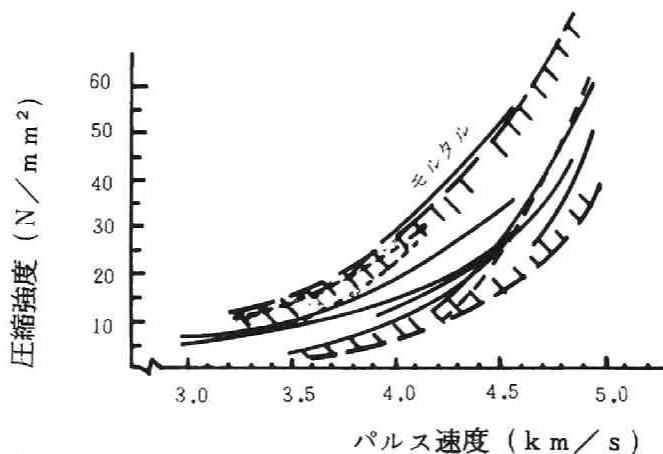


図 1.5 1969年にRILEMがまとめたパルス速度とコンクリートの圧縮強度の関係のばらつきの範囲

しかし、コンクリート中を伝わって来た弾性波はコンクリートの内部組成を表す貴重な情報源であり、この波を解析することで今後凝結硬化時期におけるコンクリート作業の合理化への道が開ける可能性もある。

微少振動法はフレッシュペーストあるいはモルタルに試料の構造破壊が生じない程度の微少振幅で試料を振動させ、その応答特性から弾性成分や粘性成分を測定するもので、回転粘度計を改良したことが多い。

二重円筒型回転粘度計タイプのものには梅屋らの開発したR. C. P. 法 (Raised Cosine Pulse 法) をペースト、モルタルおよびコンクリートに用いた玉井ら⁶⁵⁾ 水口の研究がある。R. C. P. 法は二重円筒の外円筒を1パルスだけ動かし内円筒の応筒トルクを測定して粘弾性定数を求めるもので、レオベキシアナライザーという商品名で市販されている。この方法による研究結果では経時的に弾性成分が粘性成分に対して卓越してくるようになり、ペーストやモルタルが弾性的になる過程を粘弾性定数を用いて説明している。

また円錐円板粘度計タイプのものにはワイセンベルグレオゴニオメータ (Weissenberg Rheogoniometer) がある。測定原理は円板を微少振幅でねじり振動させ、円錐の応答トルクによって粘弾性定数を求めるもので、この方法による研究には、Cusens⁶⁹⁾ らの研究がある。

Cusens によると、セメントペーストの粘度は、振動を受けるとチクソトロピー現象による粘性の低下成分Aと、化学反応による粘性の増加成分Bの合成として図1・6のように $A+B=C$ で表現できるとして、実験結果として図1・7を得ている。図は粘性の時間変化を表わしたも

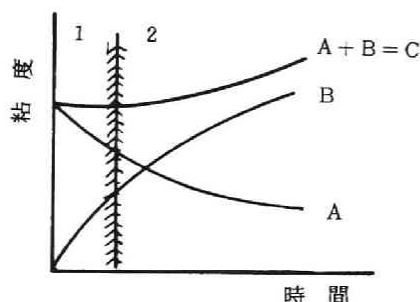


図 1.6 粘性の成分

A : チクソトロピック, B : 化学反応, C : 合成

1 : チクソトロピーの影響の大きい領域

2 : 化学反応の進行に伴って徐々に粘性が増加する領域

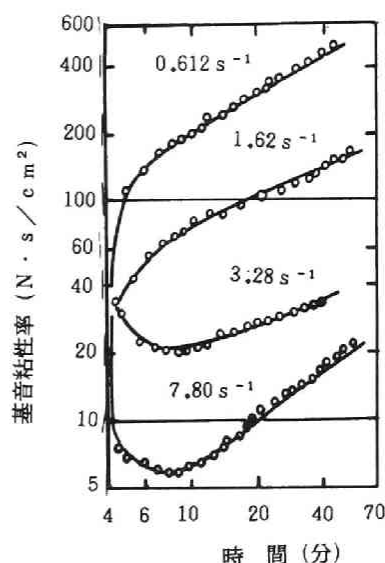


図 1.7 粘性率の時間変化 (Cusensらによる)⁶⁹⁾
[$f=10\text{Hz}$, $W/C=0.3$, ペースト]

のであるが、振動数を一定 (10Hz) として速度勾配を変化させた場合、速度勾配が大きければ構造破壊によるチクソトロピーの成分の影響が大きく作用するため、粘度は最初低下するがやがて化学反応による成分の増加に伴ない逆に増加することを示している。また降伏値に関しても同様の現象が認められるとしている。

微少振動による方法は凝結過程を知る上で有望な方法ではあるが、駆動面付近における試料の不均一性から生じるねじり振動エネルギーの減少が無視できる試料厚は限定されており、水口⁷⁰⁾

によると試料厚2.5および5 cmのコンクリートでは非常に小さな変形でもすべりの存在がみとめられ、今後検討を要する問題が多いと結論づけている。上記において水口以外は試料厚は1 cm以内でありペースト、モルタルが対象となっている。

1・5 結 論

以上述べてきたように、フレッシュコンクリートの動的問題の対象となるような、振動・波動に関する基礎的な研究は十分に行われているとは言えず、不明な点も多い。特にセメントペーストの流動特性が経時的に変化することが問題をより複雑にしている。したがって、フレッシュコンクリートの振動・波動に対する性質を定量化することは、動的問題が関係する施工条件に要求されるコンクリート品質を明確化する上で不可欠な課題であって、施工の合理化への基礎資料となるものである。

そのためには、定量化するための動的測定法が問題となってくるが、現在のところ対象とする問題によって周波数帯域や振幅などが広範で一つの方法によって処理することは困難である。また配合要因などとの関連についても明確にされていない部分が多い。

参 考 文 献

- 1) Eyman, K. H. : "Pulses in concrete technology" Jour. ACI, Vol.77, No.2, 1980, (78-81)
- 2) 例えばKirkham, R. H. H., A. C. Whiffin : "Experiments on the vibration of freshly placed concrete", The Engineer, Vol. CXCI, No. 5012, 1952 (240-243)
- 3) 例えば Jones, T. E. R., G. Brindley, B. C. Patel : "A study of the rheological properties of cement pastes " Cement and Concrete Association Proc. of a conference held at the Univ. of Sheffield, 8-9 April 1976 (134-143)
- 4) 例えばWhitehurst, E. A. : " Use of the soniscope for measuring setting time of concrete" Proc. of ASTM, Vol. 51, 1951 (1166-1176)
- 5) Ritchie, A. G. B.: "The triaxial testing of fresh concrete" Mag. of Concrete Research, Vol. 14, No. 40, 1962 (37-42)
- 6) Granville, W. H., A. R. Collins, D. D. Matthews : " The grading of aggregates and workability of concrete" Road Research Technical Paper, No.5, 1947 (1-38)
- 7) Powers, T. C. : "Study of workability of concrete " Jour. of ACI, Vol. 28, 1932 (419)
- 8) BSI : "BS 2787, BS 3446, BS 892, BS CP224" Definition of Construction terms, Vol. 1, Vol. 5, 1977
- 9) 日本規格協会 : "JIS A 203-1980 コンクリート用語" 日本工業規格
- 10) ASTM : "Standard definition of terms relating to concrete and concrete aggregate "

ASTM Standard, 1981

- 11) 土木学会 : “コンクリート標準示方書・解説” 昭和55年版 (16-17)
- 12) 日本建築学会 : “建築工事標準仕様書・同解説” JASS5 鉄筋コンクリート工事, 1979 (4)
- 13) 日本コンクリート工学協会 “コンクリート用語 (2)” コンクリートジャーナル, Vol. 10, No. 12, 1972, (86-90)
- 14) ACI : “ACI Manual of concrete practice Part 1. Material and general properties of concrete, Cement and concrete terminology” ACI Committee 116, 1981.
- 15) Tassios, T. P. : “Plasticity and cohesiveness of fresh concrete” Proc. of a RILEM Seminar, Leeds, 1973, Vol. 1 (1.3-1 ~ 1.3-36)
- 16) Neville, A. M. : “Properties of concrete” Pitman Publishing Limited, 1977, ‘ネビルのコンクリートの特性’ 後藤幸正, 尾坂芳夫訳, 技報堂, (161-190)
- 17) Tattersall, G. H. : “The workability of concrete” A Viewpoint Publication, Cement and Concrete Association, 1978, (1-3)
- 18) Tattersall, G. H., P. F. G. Banfill. : “The rheology of fresh concrete” Pitman Advanced Publishing Program, London, 1983, (1-9)
- 19) Ritche, A. G. B. : “The rheology of fresh concrete” Proc. of the ASCE Vol. 94 (const. div.), 1968, (55-74)
- 20) Bache, H. H. : “The processing of fresh concrete” Proc. of a RILEM Seminar, Leeds, Vol.3, 1973 (5.1-(a) ~ 5.1-67)
- 21) L'Hermite, R., G. Tournon. “Vibration of fresh concrete,” Technical Publication No 2, Centre d'Etudes et de Recherches de L' Industrie des Liants Hydraulique, Paris, 1948.
- 22) 柴田 徹, 岡二三生 : “地盤の液状化3, 液状化のメカニズム” 土と基礎 29-9 (284), 1981, (83-91)
- 23) 安田 進, 土田 肇, 谷口栄一 : “地盤の液状化5, 液状化の予測(その1)” 土と基礎, 29-12 (287), 1981, (69-76)
- 24) 谷口栄一, 安田 進 : “地盤の液状化6, 液状化についての諸基準” 土と基礎, 30-3 (290), 1982, (69-76)
- 25) Forssblad, L.: “Investigations of internal vibration of concrete,” Civil Engineering and Building Construction Series No 29, Acta Polytechnica Scandinavica, Stockholm, 1965, (1-32)
- 26) 岩崎訓明 : “コンクリートの特性” 共立出版, 昭和53年, (32-34)
- 27) Kirkham, R. H. H., M. G. White, : “The compaction of concrete road slabs,” Road Research Technical Paper No 54, Her Majesty's Stationary Office, London, 1962, (1-61)
- 28) 近藤泰夫, 坂 静雄監修 : “コンクリートハンドブック” 朝倉書店, 昭和46年, 8版, (210)
- 29) 岩崎訓明 : 前掲の26) (34)
- 30) Halken, O. V., : “Technology of concrete consolidation,” Betongelmentforeningen,

Copenhagen, 1977.

- 31) Alexandridis, A., N. J. Gardner : "Mechanical behaviour of fresh concrete" Cement and Concrete Research, Vol.11, No 3, 1981, (323-339)
- 32) Bache, H. H. : 前掲の20)
- 33) Legrand, C. "Contribution à l'étude de la rhéologie du béton frais," Matériaux et Constructions. Vol. 5, No 29, 1972, (275- 295)
- 34) Bergström, S. G., : "Laboratry tests on vibration of concrete, " Jour. of ACI, Vol. 24, No 10, 1953, (893-908)
- 35) Tattersall, G. H., P. F. G. Banfill, : 前掲の18)の (171-172)
- 36) L'Hermite, R., G. Tournon : 前掲の21)
- 37) Desov, A. E., "Structural viscosity of cement and concrete mixes, " Kolloid. Zhur., Vol.13, No 5, 1971, (346-356)
- 38) 明石外世樹, 葛目和広 : "フレッシュコンクリートの振動時の粘性について," セメント技術年報 Vol. 26, 1977, (272-276)
- 39) 明石外世樹ほか2名 : "フレッシュコンクリートの振動時の特性について" 土木学会等30回年次学術講演会講演概要集, 等5部, 昭和50年, (87-88)
- 40) 西村新蔵ほか3名 : "振動下におけるフレッシュコンクリートの挙動に関する基礎的研究"材料, Vol. 29, No 318, 1980, (247-252)
- 41) 松藤泰典 : "打込み時におけるコンクリートの問題点(その1)" セメントコンクリート, No. 430, 1982, (42-49)
- 42) 土木学会 : "振動台式コンシステンシー試験方法(土木学会-1974)"コンクリート標準示方書, 昭和55年版, (369)
- 43) 山田順治, 有泉昌 : "わかりやすいセメントコンクリートの知識" 鹿島出版会, 1979, (67)
- 44) 笠井芳夫 : "コンクリートの初期性状" コンクリートジャーナル, Vol. 11, No 10, 1973 (1-15)
- 45) Tuthill, L. H., Cordon, W. A., : "Properties and uses of initially retarded concrete, Jour. of ACI, No 52, 1955, (273-286)
- 46) 鳥田専右 : "レデーミクストコンクリートによるコールドジョイントの性質" 日本建築学会論文報告集, No 135, 昭和42, (10-19)
- 47) 酒井実ほか5名 : "超遅延減水剤を用いた冷凍倉庫のコンクリート施工,"コンクリート工学, Vol. 19, No 6, (19-26)
- 48) 近藤泰夫, 坂静雄監修 : "コンクリート工学ハンドブック"朝倉書店, 昭和46年版, (212)
- 49) Kelly, T. M., D. E. Bryant, : "Measuring the rate of hardening of concrete by bond pullout pins, "Proc. of ASTM, Vol.57, 1957, (1029-1042)
- 50) 渡辺嘉香, 小林辰男 : "コンクリートの初期硬化に関する研究," セメント技術年報, Vol.14, 1960 (371-376)
- 51) 明石外世樹, 山路文夫 : "超音波パルスによるコンクリートの凝結について," セメント技術年報, Vol. 12, 1958, (164-171)
- 52) Suzk, G., : "Use of special instruments for testing setting time of cement paste, " steam-

- curing concrete as well as hardning process of concrete RILEM Bulletin, No.16, 1962, (29-39)
- 53) 神田衛 : “コンクリートの硬化時間に関する研究” セメント技術年報, Vol. 16, 1962, (446-452)
- 54) 梅屋薫 : “セメントモルタルのレオロジー” 土木工学会誌, Vol. 64, No.4, 1979, (27-34)
- 55) Whitehurst, E. A.: “Use of the Soniscorpe for measuring seting time of concrete, “Proc. of ASTM, Vol.51, 1951, (1166-1183)
- 56) Cheesman, W. J.: 前掲の55)のDiscussion の中の報告, (1176-1183)
- 57) Jones, R. : “ The non-destructive testing of concrete,” Mag. of Conc. Res., No.2, 1949, (67)
- 58) 明石外世樹, 山路文夫, : 前掲の51)
- 59) 渡辺嘉香, 小林辰男 : “コンクリートの初期硬化について,”セメント技術年報, Vol. 15, 1961, (229-234)
- 60) 笠井芳男 : “コンクリートの初期強度に関する研究”セメント技術年報, Vos.15, 1961, (387-393)
- 61) Malhotra, V. M : “Maturity concept and the estimation of concrete strength, “ A review, dept. of Energy. Mines and Resources, Mines Branch Information Circular, Ottawa, 1971.
- 62) Freiesleben, Hansen, Pederson : “ Maleinstrument til kontrol of betons haerdening, “ Nordisk Betong, No 1, 1977, (21-25)
- 63) 渡辺嘉香, 小林辰男 : 前掲の59)
- 64) RILEM : “Nondestructive testing of concrete” Materials and structures, Vol. 2, No 10, 1969, (253-293)
- 65) 梅屋薫 : 前掲の54)
- 66) 玉井元治, 川東龍男 : “ 高性能減水剤を用いたセメントペーストのレオロジー” セメント技術年報, Vol. 34, 1980, (163-167)
- 67) 玉井元治, 川東龍男 : “ 高性能減水剤を用いたセメントペーストのレオロジー特性 ” 第3回コンクリート工学年次学術講演会論文集, 1981, (37-40)
- 68) 水口裕之 : “フレッシュモルタル・コンクリートの性質の経時変化に関する一実験, ” 第3回コンクリート工学年次学術講演会論文集, 1981, (221-224)
- 69) Cusens, A. R., J. Harris, : “A rheology study of fresh cement pastes,” Proc. of RILEM Seminar, Vol., 2, Leeds, 1973, (2.8-1~2.8-34)
- 70) 水口裕之 : 前掲の68)

第2章 フレッシュコンクリートの せん断変形特性に関する研究

第2章 フレッシュコンクリートのせん断変形特性に関する研究

2.1 概 説

フレッシュコンクリートの動的問題として、従来から考えられてきたのは振動機などで一定の繰返し応力をコンクリートに与え締固めを行うことを念頭においたものが中心であった。¹⁾⁻⁶⁾コンクリートに振動をかけるということは、繰返しせん断を加えることを意味する。このせん断力によりペースト部分が流動を起し、大きな速度勾配によって粘度が低下することから骨材粒子の沈降の促進、またフロック状態にあるペーストの網目構造内の不動水が解放されることで更に粘度が低下し一時的に流動性能を向上させることである。また正弦振動の場合、たとえひずみは小さくても運動が速くなるにつれて慣性力が大きくなり、この影響が効いてくる場合もある。

このように動的問題は要約すれば3つの要素に帰着される。それは①載荷速度（載荷時間）②繰返し効果 ③ひずみの大きさである。載荷速度は所定の応力またはひずみが試料中に達成される時間と関係する。また、繰返し効果は例えば衝撃や波動のような1回から数回のものから振動締めのような数千回に及ぶものや、さらに交通、機械振動のように数百回から何百万回といった回数に關係する。ひずみの大きさについては、ひずみが大きくなれば静的な問題と何ら変わりのないことで微小ひずみが①と関連して動的な問題を発生させると考えられる。本章では③のひずみの大きさとフレッシュコンクリートの応力の関係すなわち応力-ひずみ関係を明らかにし、動的問題の基礎資料とすることを目的としている。

このような考えでフレッシュコンクリートのせん断変形特性を扱った研究としては、コンクリートを細・粗骨材からなる粒状体として考えると土と類似した物質となるため、土質工学における従来から用いられてきた試験装置をコンクリート用に改良して行われた例が多い。コンクリートのせん断変形に対する内部抵抗は骨材の摩擦とマトリックスであるペーストの占める容積やペーストの軟らかさの程度および骨材粒子間の粘着力によって引起される。このことから一面せん断試験、三軸圧縮試験によって粘着力、内部摩擦角を求める試みがなされている。L'Hermite⁷⁾は振動とフレッシュコンクリートのレオロジー的性質を明らかにする目的で振りリング一面せん断試験機を用いて実験を行った結果、リングのトルクと回転角の關係は図2.1のように直線的に増加し、最大値に達した後破壊が起り、この最大値は垂直圧力にはほぼ比例するとしている。この時の最大トルクと垂直圧力の關係から図2.2のようにコンクリートが粘着力を有することを示した。また振動の前と後では内部摩擦角および粘着力とも増加するとしている。またTassios⁸⁾も、モルタルについて一面せん断試験を行い、同様のせん断応力-ひずみ關係を得ているが、特に粘着力は水セメント比、骨材粒度、温度によって変化し、粘着力が最大値を示す水セメント比が存在するとしている。これは、TattersallのTwo-point試験法から得られた降状値が最大を示す水セメント比が存在するという結果と一致している。⁹⁾三軸圧縮試験はRitche¹⁰⁾が非圧縮非排水(U-U)条件でコンクリートに適用して以来、Vzomaka¹¹⁾によってU-Uおよび圧密非

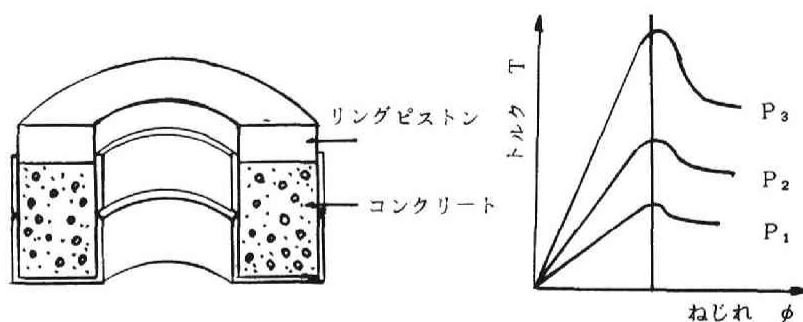


図2.1 ねじりリング一面せん断試験機によるフレッシュコンクリートのせん断強度試験結果 P : 垂直応力 (L' , Hermite)⁷⁾

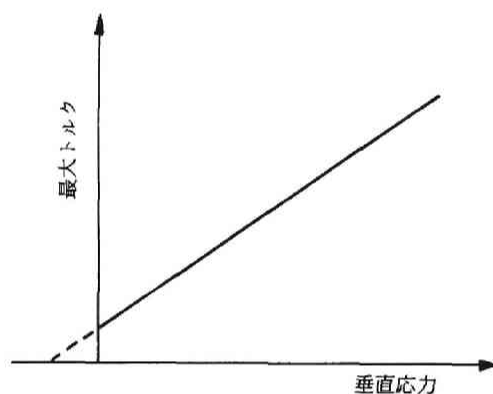


図2.2 垂直応力と最大トルクの関係 (L' , Helmite)⁷⁾

排水 (C-U) 条件について行われ、コンクリートの可動性が内部摩擦角に関係することが示された。我国においても一面せん断試験については村田¹²⁾や著者¹³⁾らにより、また三軸圧縮試験については西林¹⁴⁾ら¹⁵⁾によって実施され、同様の傾向を示す結果を得ている。なお、三軸圧縮試験は近年RCD (Roller Compacted Dam) 工法のコンクリート品質の管理への適用性についての検討がなされている。¹⁶⁾

2.2 回転粘度計によるペーストおよびモルタルのせん断変形特性¹⁷⁾

2.2.1 はじめに

コンクリートのせん断変形特性は、コンクリートをペーストと骨材あるいはモルタルと粗骨材の複合材料であると考え、マトリックス部分と骨材部分の占める容積比率によって影響を受けるはずである。また骨材とマトリックスの容積比率を一定とすれば、マトリックス部分の性質によってせん断特性は影響されるであろう。この節ではマトリックス部分のせん断特性について

明らかにすることを目的として、まずペーストについての実験をし、次にモルタルをマトリックスとしての特性と、最大寸法 5 mm の骨材を有するコンクリートの特性の 2 通りの役割について両面でとらえることにした。

せん断変形を与えるための装置としては変形を無限に与えることが出来る点を考慮して回転粘度計を使用し、ペーストおよびモルタルの配合とせん断応力—ひずみ関係について実験的研究を行った。

2.2.2 実験計画

実験には、セメントは普通ポルトランドセメント（日本社）、細骨材は豊浦産標準砂を使用した。また、混和剤を混入した場合についての影響を調べるために減水剤としてポゾリス No. 5 L、高性能減水剤としてマイティ 150 を使用した。

配合については、ペーストは水セメントを $W/C=30\%$ 、 40% 、 50% の 3 水準とし、モルタルについては水セメント比を $W/C=40\%$ 、 50% の 2 水準、砂セメント比を $S/C=0.5$ 、 1.0 、 1.5 、 2.0 の 4 水準で変化させ、砂の充填による影響を調べることにした。

また混和剤の添加量はセメント重量の 0.25% 、 0.50% 、 0.75% 、 1.0% とした。

せん断試験に用いた装置は図 2.3 に示す外円筒回転型の粘度計である。外円筒の直径は 10 cm で、試料と鋼製円筒壁面との間で発生する水膜による滑り防止のため直径 1 mm の針金を円筒軸方向の壁に 5 mm 間隔で接着した。測定部の詳細は図 2.4 に示す。外円筒の回転速度は 1 deg/秒 の割合で定常回転させた。トーションワイヤーは直径 2.3 mm～5.0 mm、長さ 67 cm～69 cm のピアノ線を配合による発生トルクの大きさに応じて用いた。実験の結果は図 2.3 の X・Y レコーダの

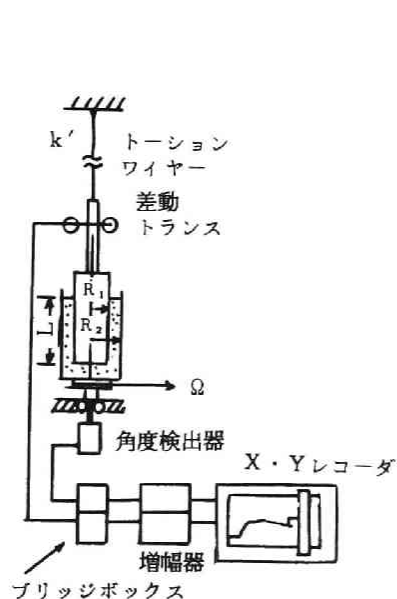


図 2.3 外円筒回転型粘度計

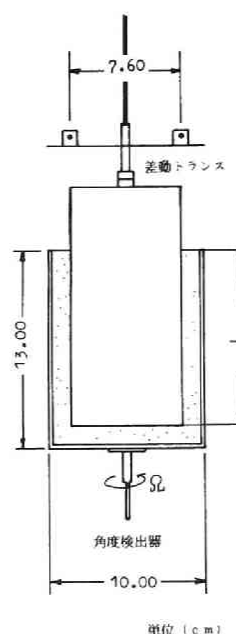


図 2.4 測定部詳細図

X軸に外円筒回転角, Y軸に内円筒のねじれ角を入れて記録紙に描かせた。これらを応力一ひずみ図に変換した結果の典型的なものは図2.5のような形となる。フレッシュコンクリートは弾性体であるとはいえないが, 図のように変形と応力の関係で表すと, あたかも弾性体のような挙動を示す性質を有している。本研究においては図中において, 原点からの直線部の勾配をみかけのせん断弾性係数(以後せん断弾性係数と呼ぶ) G_i , せん断応力の最大値を最大せん断応力(せん断強度) τ_{\max} と定義する。

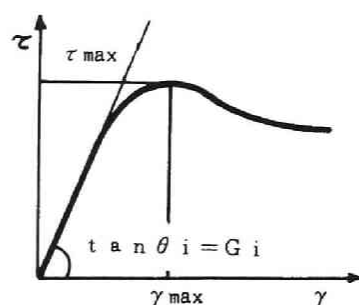


図2.5 せん断弾性係数 G_i および最大せん断応力(せん断強度) τ_{\max}

2.2.3 実験結果および考察

(1) 内円筒の形状による影響

コンクリートのような固一液混合体が金属のような密度の大きな物体面と接触すると, 薄い水の液膜が金属との境界面に発生する。これが水量の多いコンクリートであれば毛管現象によりブリージング水となってどんどん供給されることになる。このような液膜の発生した状態で二重円筒の回転面を回転させても液膜の分だけトルクの伝達が不十分となり, 実際のせん断抵抗力を小さく見積ってしまう。この現象が回転粘度計でよく問題とされるすべりと呼ばれる現象である。¹⁸⁾ 従ってすべりの除去が問題となる。すべりの原因が円筒壁面と水の毛管現象, 表面張力によって発生するのであれば, できるだけ壁面積を少なくする方法でせん断力の伝達をした方がよい。図2.6のような方法で回転してやればトルクは鉛直方向の線状の金属面と試料により伝達される。このような考え方は土質試験の現位置せん断試験のベーンせん断試験法¹⁹⁾に適用されている。コンクリートについてもベーンによるせん断試験は2.3試みられている。²⁰⁾⁻²²⁾ 本研究においても基礎

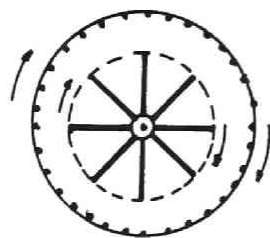


図2.6 回転粘度計内の仮想せん断面

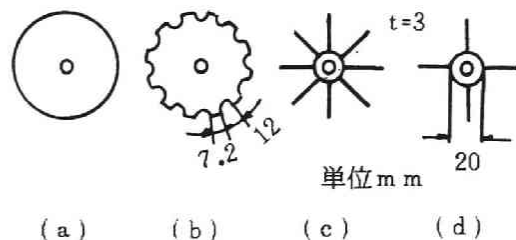


図2.7 内円筒の形状寸法

的研究として、回転体を円筒から12枚、8枚、4枚翼へと仮想せん断における壁面積を減じた場合のせん断挙動を測定した。内円筒の形状は図2.7のように a)円筒の表面に豊浦標準砂を接着剤で貼付したもの b)円筒を直径12mmのドリルで削った12枚羽根 c)8枚羽根 d)4枚羽根の4種類とした。

内円筒の寸法については表2.1に示す。

表2.1 円筒の寸法

	直径 (mm)	高さ (mm)	重量 (g)
円筒	77.6	159.7	5792
4枚羽	76.7	159.2	806
8枚羽	75.5	159.6	1226
12枚羽	75.8	159.8	4831

せん断応力 τ は、試料の回転により内円筒に発生するトルクを内円筒のねじれ角 θ およびトーションワイヤーのねじれ定数 k' から求め、円筒または仮想せん断面によってできる仮想円筒の表面積および仮想円筒の底面から次式によって求める。

$$\tau = \frac{12k'\theta}{\pi D^2(6L+D)} \quad (2.1)$$

ここで、 D は内円筒又は仮想円筒の直径で、 L は試料中に没している深さである。

図2.8はモルタルの外円筒回転角と内円筒のねじれ角の関係を示したものである。これを図2.5で定義した最大せん断応力 τ_{\max} およびせん断弾性係数 G_i について計算すると表2.2のようになる。これを図示したのが図2.9である。図よりペーストは水セメント比の増大により、即ちペーストの濃度が薄くなるにつれて最大せん断応力ならびにせん断弾性係数が低下する。²³⁾特にせん断弾性係数は、Powers によるとペーストの硬さを表し、その逆数 ($1/G_i$) は軟ら

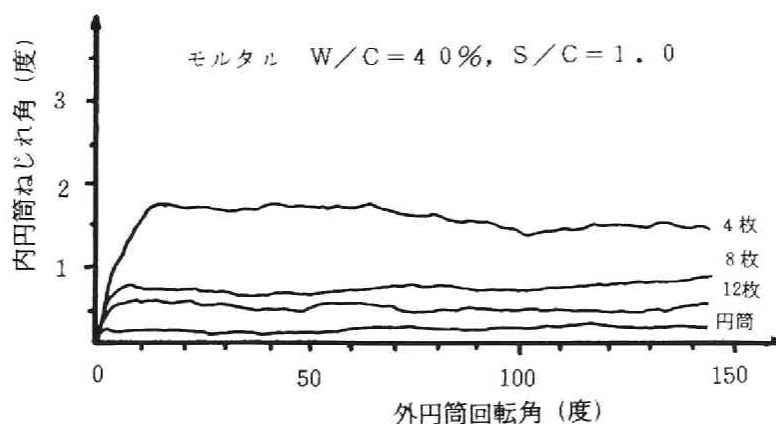
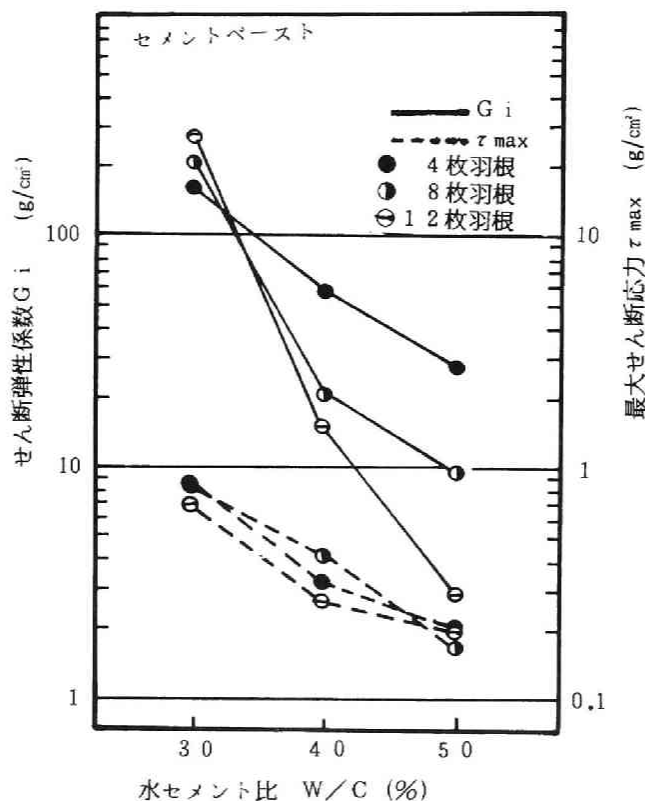


図2.8 外円筒回転角とねじれ角の関係例

表 2. 2 ペースト、モルタルの最大せん断応力 τ_{\max} とせん断弾性係数 G_i

ペースト		τ max (g/cm ²)			G_i (g/cm ²)			
W/C (%)	4 枚羽根	8 枚羽根	1 2 枚羽根	4 枚羽根	8 枚羽根	1 2 枚羽根		
3 0	0. 8 5 6	0. 8 5 6	0. 6 9 4	1 6 7. 7	2 1 1. 5	2 6 7. 7		
4 0	0. 3 2 3	0. 4 1 2	0. 2 7 2	5 8. 1	2 1. 4	1 4. 8		
5 0	0. 4 4 9	0. 1 2 7	0. 1 9 5	2 7. 9	9. 6	2. 9		
モルタル (W/C = 5 0%)								
		τ max (g/cm ²)			G_i (g/cm ²)			
S/C	4 枚	8 枚	1 2 枚	円筒	4 枚	8 枚	1 2 枚	円筒
0. 5	0. 5 8	1. 4 0	0. 7 1	1. 0 5	5 8. 7	1 7. 3	3 4. 3	2 8. 9
1. 0	2. 3 7	1. 7 4	1. 4 2	1. 1 9	8 4. 3	2 2. 4	2 9. 5	3 0. 1
1. 5	0. 7 6	0. 9 3	2. 6 9	0. 9 0	3 5. 6	7 4. 1	6 6. 3	6 4. 1

図 2. 9 ペーストの水セメント比とせん断弾性係数 G_i および最大せん断応力 τ_{\max} の関係

かさ (modulus of softness) を表わすとしており、水セメント比の増加がペーストを軟らかくしていることを示すものである。ペーストの場合、ペーンの枚数は最大せん断応力にはあまり影響しないが、せん断弾性係数は水セメント比が大となるにつれてペーンの枚数の増加とともに著

しく減少している。これは先に述べたように水セメント比の増加は毛管水（自由水）量を多くし、水膜の形成を早める。仮想せん断面の形成後の水の供給はせん断面上の金属の面積に影響されることから枚数の影響が出たものと思われる。次にモルタルの場合、水セメント比（ $W/C=50\%$ ）を一定にして細骨材量の影響を調べた結果を図2.10に示す。最大せん断応力は、内円筒の形状

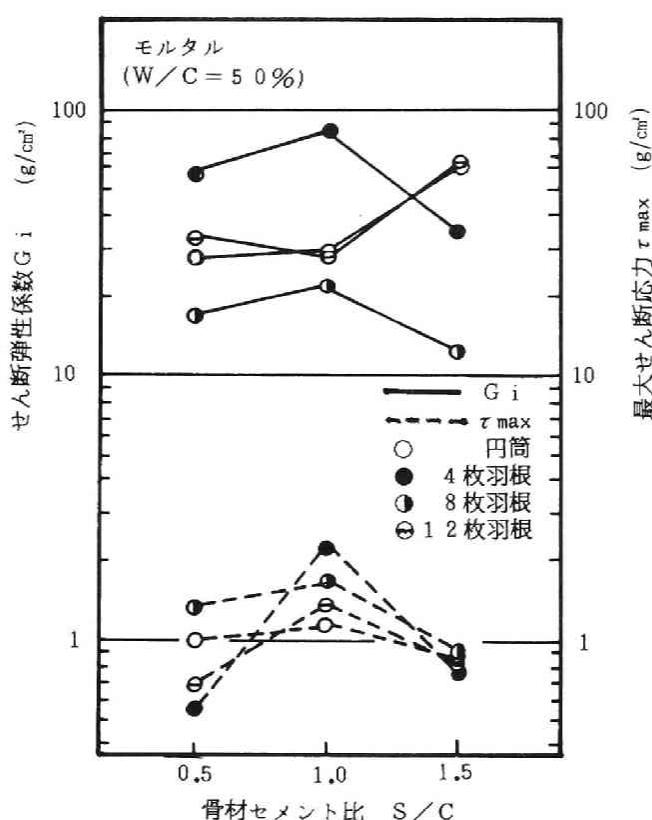


図2.10 モルタルの砂セメント比とせん断弾性係数 G_i および最大せん断応力 τ_{max} の関係（ $W/C=50\%$ ）

にあまり影響されない。また配合に関しては、砂セメント比が1.0付近で最大値になっている。この場合、モルタルがペースト中に砂粒子が懸濁したものであると考えると、砂粒子の容積濃度は0.32となり、最密充填までは少し余裕があるので砂セメント比を大きくすることで最大せん断応力は増加するように思える。しかしセメント粒子も固体分に含めて、計算すると約0.584となり、粒径が等しい場合の最粗充填0.52と最密充填の0.67の中間的な値になる。したがって普通の突き固め程度では、砂セメント比1.0付近が最大となりせん断抵抗力が最大となることが考えられる。しかし、砂セメント比が1.5付近になるとせん断面と試料との間ですべりの発生する可能性もあり、装置の分解性能を考慮すると上述の理由では十分な説明とは言えないが実験の傾向としては砂セメント比が1.0付近が最大となる。

せん断弾性係数 G_i は内円筒の形状によって2つの傾向が認められるので骨材量の影響について言及はできないが、 $10^1 \sim 10^2 \text{ g/cm}^3$ の範囲に大きくばらついていることから、モルタルではペーストに比較して締固めの程度や空気量の影響が出やすいものと考えられる。

(2) せん断応力-せん断変形曲線

ペーストまたはモルタルのせん断変形特性は、1941年に Powers と Wiler によって開発され Pickett²⁴⁾ によって改良された円環型プラストメータ (Recording Plasto-meter) を用いた実験が最初であろう。彼らの報告によると図 2.11 に示すように外円筒の回転により円環に発生するせん断応力は、ほぼせん断ひずみに比例して増加し、ある角度から直線より逸脱し、せん断破壊に至る。

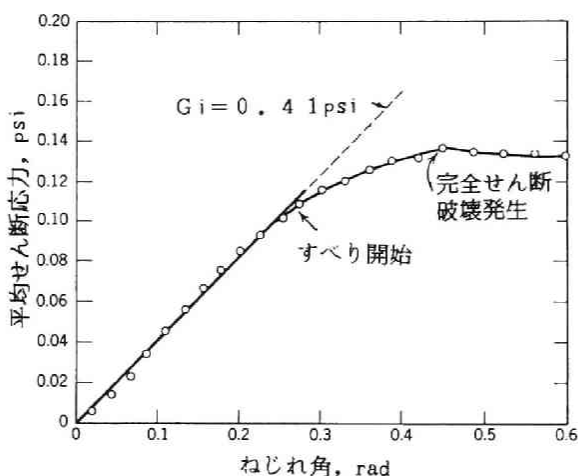


図 2.11 円環型プラストメータによるモルタルの代表的応力・ひずみ図
[W/C=37.6%, スランプ 8 in, 0.05rad/sec] (Powers, Wiler)²³⁾

この逸脱点を弾性限界と考え、塑性流動がビンガム流動の降伏値を越したあたりから始まるのと同じ現象であるとしている。本研究においても図 2.8 の結果が示すように彼らと同様の曲線形状となった。最大せん断応力はペーストよりもモルタルの方が概して大きな値となっている。このことは、モルタルの場合には、ペーストの粘弾性的（塑弾性的）性質に、骨材粒子が容器に詰められせん断を受けることでダイラタンシーや骨材の衝突、摩擦、回転の抵抗力が加わることを示唆している。

(3) せん断変形の経時変化

練混ぜ直後におけるセメントペーストのせん断強度特性は、主としてセメント粒子の粒子間引力により形成された網目状構造の強さの程度に支配されている。そして時間が経過すれば水和作用により、この構造はより強固なものへと発達して行く。即ち凝結から硬化へとよりこわばりの程度を増して行く。図 2.12 は水セメント比 40% のペーストの経時変化を示したものである。最大せん断応力、せん断弾性係数とも時間の経過と共に増して行くのがはっきりとわかる。ただし、180分経過したものは装置の分解性能を越しているので傾向が少し違う。また変形の形態が粘性

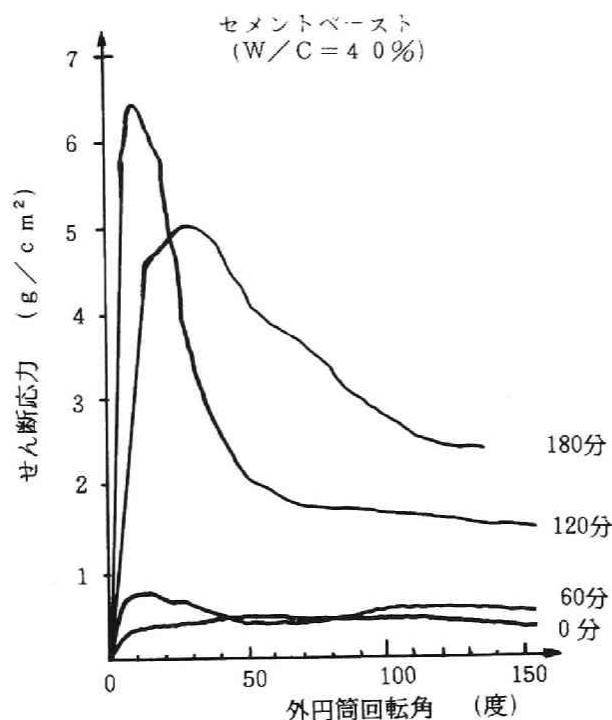


図2.12 ペーストの応力・ひずみ図の経時変化例

流動的なものからピークがはっきりと表われる粘弾性体のような形へと移行して行く様子が伺える。モルタルについても図2.13で表わされるようにペースト同様の傾向を示した。モルタルの応力・変位曲線は変位の増加につれて直線的にそのせん断抵抗を増し、最大値に達するが、最大せん断応力は時間と共に増加する。最大値以上の変形が与えられると構造破壊が起り、せん断抵抗は減少するが砂粒子間の摩擦、ペーストの粘性、粘着力、せん断強度、ダイラタンシー等の抵抗力を合計した値（残留強度）に安定する。この中でペーストのせん断強度²⁵⁾の経時的増加がモルタルの残留強度に最も影響する因子であると考えられる。Lambe は粘性土のせん断応力とひずみの関係を図2.14のように三つの成分に分けて説明している。ダイラタンシーはあまり大きなものと考えにくいので経時的には粘着力の増大と摩擦+相互作用の合計により応力-ひずみ関係が変化すると考えられ、図2.12、図2.13の形状変化を説明することができる。しかし具体的な成分の配分をすることは出来ないが経時的には粘着力の変化が形状変化に影響しているものと思われる。

（4）高性能減水剤を添加した場合のせん断変形特性

高強度コンクリート用の減水剤として高い分散性を発揮する高性能減水剤はセメント粒子表面の電位を著しく低下させることからセメント粒子によって形成される三次元網目状構造を小さなせん断力で簡単に破壊させることができる。即ちペーストやモルタルのこわばりの程度を著しく低減することが可能であると考えられる。

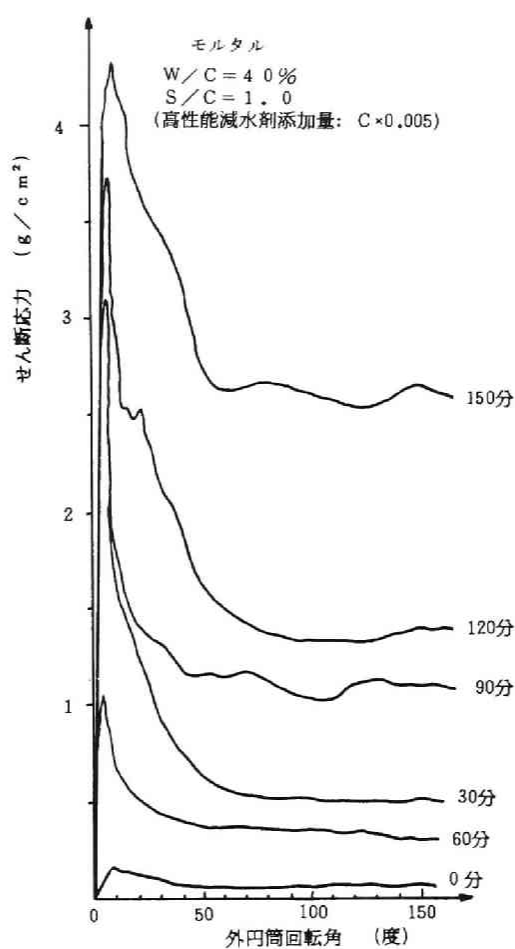
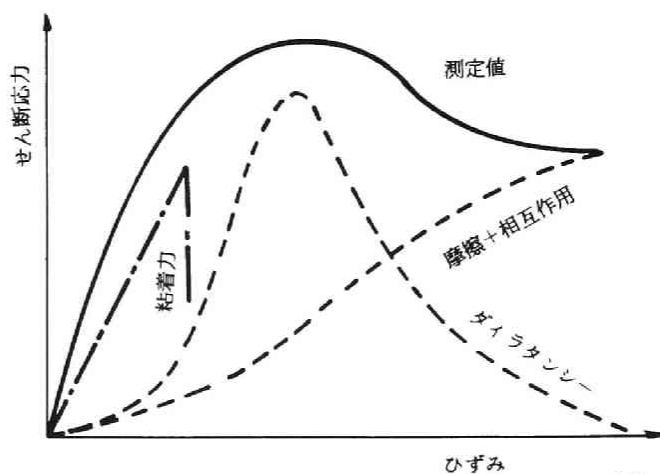


図 2.13 モルタルの応力・ひずみ図の経時変化例

図 2.14 粘性土のせん断応力とひずみの関係 (Lambe)²⁵⁾

水セメント比40%のペーストに高性能減水剤としてナフタリン系のマイティ150（花王石鹼社製）をセメントの重量に対して0.25%，0.50%，1.00%を加えた場合のせん断特性を調べてみた。図2.15は高性能減水剤の添加量とせん断弾性係数および最大せん断応力の関係を示したものである。添加量が0.25%ないし0.50%程度でせん断特性値は約1/10以下に低下しておりペーストが

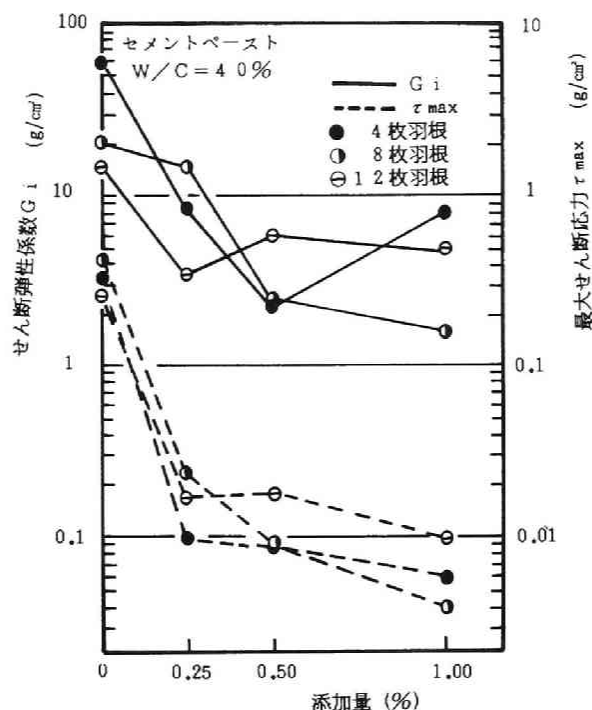


図2.15 高性能減水剤の添加量がペーストのせん断特性に及ぼす影響

軟弱らかくまた作業し易い状態となっている。0.50%以上の添加は余り効果的ではないが最大せん断応力は少しづつではあるが低減する。次に水セメント比40%のペーストの経時変化を高性能減水剤の添加量0.5%，1.0%とした場合について8枚ベーンの内円筒を使用して実験を行った。図2.16は、せん断弾性係数および最大せん断応力の180分程度までの経時的変化を示したものである。

プレーンのペーストに比べて高性能減水剤を添加したペーストは練混ぜ直後においては小さい値を示しているが、せん断弾性係数は30分程度で急激な増加をしており、こわばりの回復が早いことを示している。

これに対して最大せん断応力はプレーンと同程度の割合で増加しており、高性能減水剤を添加したコンクリートのスランプロスが大きいという性質とせん断弾性係数の急激な増加が関係しているものと考えられる。

次にモルタルについては水セメント比40%，砂セメント比1.0のモルタルに減水剤としてポゾリスNo.5 L，高性能減水剤としてマイティ150をそれぞれセメント量に対して0.25%，0.50%，0.75%を添加して経時変化の関係を調べた。結果を図2.17に示す。プレーモルタルは180分程

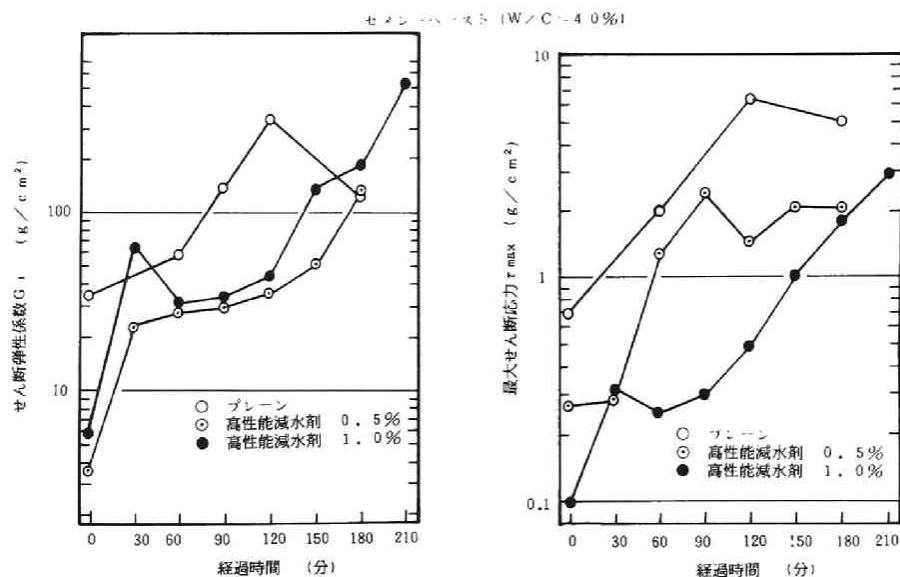


図 2.16 ペーストのせん断弾性係数 G_i 及び最大せん断応力 τ_{\max} の経時変化

度であれば両値は急激な増加はせず、徐々に増加して行くが、高性能減水剤を添加したモルタルは特にせん断弾性係数については急激な増加があり、最初は低い値を示していてもこわばりを生ずるのが早い、即ちスランプロスの傾向がみとめられる。また添加量により低い値を示す傾向がみられた。最大せん断応力は急激な増加はなく漸増の傾向を示した。減水剤使用モルタルについてはその中間的な値を示しておりスランプロスの傾向はみられなかった。モルタルのせん断特性は、やはり上述のようにペーストの性質だけでは決まらず、ダイラタンシー、骨材の相互作用な

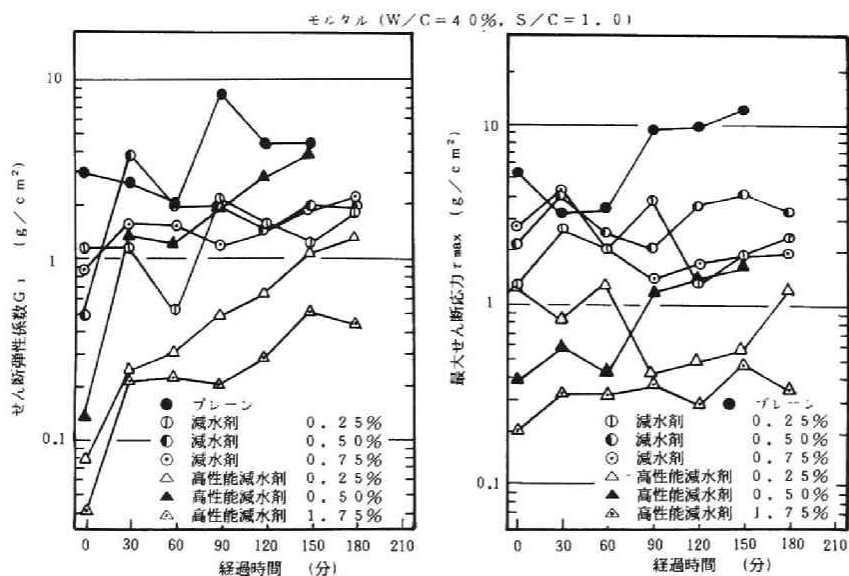


図 2.17 モルタルのせん断弾性係数 G_i 及び最大せん断応力 τ_{\max} の経時変化及び混和剤の添加量の影響

どの複合的性質が表われることが明らかとなった。

2 2 4 ま と め

ペーストおよびモルタルのせん断変形特性に関して実験的研究した結果をまとめると次のような結論を得た。

(1) 二面間に置かれたペースト、モルタルの相対ずれによるせん断変形特性を測定する場合、滑らかな金属面ではすべりまたは潤滑層が発生して試料中に一樣なせん断変形を発生しにくい。

また、ざらざらの不整表面にしても、仮想せん断面を考えるベーン型にしても、すべり、潤滑層は多少発生するが、せん断応力の伝達性能を向上させる上で有効であることが示された。

(2) 水セメント比が大きくなれば、最大せん断応力、せん断弾性係数ともに低下し、せん断弾性係数の逆数(modulus of softness)が大きくなり、即ち軟らかさの程度を物理的に意味のある数値によって表現することができる。

(3) モルタルの最大せん断応力は水セメント比を一定とした場合、砂セメント比によって影響を受けるが、ペーストの水セメント比の変化による影響の方が大きい。せん断弾性係数についても同様のことが言える。

(4) ペーストおよびモルタルは、フレッシュな段階においても硬化後の弾性限度に相当するような限界点を有しており、この点がビンガム体の降伏値に相当するものであると考えられる。

(5) 最大せん断応力の値はペーストに比べモルタルの方が概して大きな値となる。これは骨材粒子がせん断を受けることによって発生するダイラタンシー、骨材の摩擦・衝突、骨材粒子の回転によって生ずるせん断抵抗が加算されるためである。

(6) ペーストおよびモルタルの最大せん断応力およびせん断弾性係数は時間の経過とともに増加する。これにより、ペーストやモルタルのこわばりの程度を表現することができる。

(7) ペースト、モルタルの応力-ひずみの曲線は最初粘性土と同様の形状を示すが、時間の経過と共に砂質土のような形状に変化する。

(8) 高性能減水剤により粒子間引力を低下させると、最大せん断応力、せん断弾性係数ともプレーンのものと比べ低下し、ペースト、モルタルとも軟らかくなることが数値的に表現できる。また経時的には、これらの物性値の増加割合がプレーンのものと比べて大きく、こわばりが早いという現象も数値的に表現できる。

2 3 フレッシュコンクリートのせん断変形特性²⁶⁾

2 3 1 は じ め に

前節においてモルタルを粗骨材の最大寸法を5mmとしたコンクリートの一種として扱った。しかし、ペーストの骨材を分散させた状態で保持させる能力は骨材の大きさが増すにつれて低下するであろうし、練り混ぜに必要なエネルギーは増大し、空隙、水隙の発生確率も高まってくる。従って当然のことながら、実験装置を大きくして、一般の粗骨材の最大寸法程度を用いたコンク

リートの実験も行う必要性が生じてくる。本節では、実験装置をもう少し大型にして土質実験用として用いられているベーンせん断試験機、および一面せん断試験機の一部を改良してコンクリートせん断試験を行った。

2 2 2 実験計画

一般にコンクリートは飽和土、飽和粘土の性質に類似しており、せん断特性を求めるには土質工学において用いられるせん断試験機が適していると言われている。このような考えから直接せん断試験としては L'Hermite⁷⁾ や Tassios⁸⁾ の研究、三軸圧縮試験としては Ritche¹⁰⁾ の研究などがある。本節では三軸圧縮試験を適用するには、操作に熟練を要する事や試料を自立させるのが困難であるほか、間隙水圧による強度増加の補正については複雑でまだ十分解明されていないこと等を考慮して、操作が比較的簡単である直接せん断試験を行うこととした。また L'Hermite の用いた振りリング一面せん断試験は、外側ほどせん断応力が大となり正確な値が得られにくいという点を考慮して、本研究では一面せん断試験機を用いることにした。また軟練りコンクリートのような場合にでも迅速な測定が可能なベーンせん断試験も併せて行った。

実験に用いたセメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は比重2.56、F.M=3.13の海砂、粗骨材は比重2.56の川砂利を5～30mmにふるい分けたものを表乾状態にして用いた。

ベーンせん断試験は、コンクリート試験と同一条件でのペースト、モルタルについての結果も同時に得ておくため、ペーストについては水セメント比35%、40%、モルタルについては水セメント比35%、40%としセメント砂比を1:1、1:2の配合とした。コンクリートの配合は水セメント比35%、40%、セメント・細骨材・粗骨材の比率を1:1:1、1:1:2とした。

一面せん断試験は、土質実験用の在来型一面せん断試験機を用いるため軟練りの試料を用いると、排水条件が問題となるため水セメント比40%のみについて実験を行った。また試料厚の関係から骨材の最大寸法は大きくとれないので、モルタルについてのみ行った。この場合細骨材の混入量は容積率で30%、40%、50%とした。

ベーンせん断試験は図2.18に示す鋼製の十字翼ベーンが直径20cm高さ50cmのプラスチック円

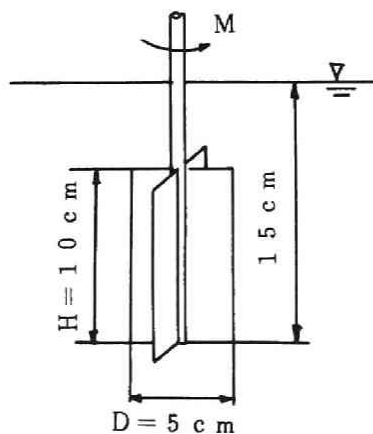


図2.18 ベーンせん断試験

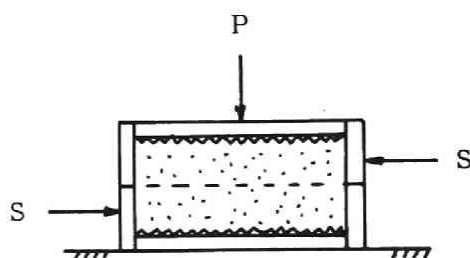


図2.19 一面せん断試験

筒容器の中心にくるように設定し、試料を3層に分け、各層が均等になるように突き棒で締め、ベーンの貫入深さが15cmになるようにした。実験は、毎秒1度の割合でベーンを回転させ、角度毎のトルクを自記記録させベーンによって生ずる仮想円筒のせん断応力は(2.1)式により計算した。

一面せん断試験は図2.19に示すせん断箱に試料を3層に詰め、各層毎に試料押出し器で15回突き固め、試料厚さを約2cmに仕上げた試料について行った。せん断は非排水にできるだけ近い状態で実験を行うため、急速せん断試験とした。せん断速度は1mm/分のひずみ制限で行ない、せん断応力がピークを越えて一定値を示すか、変位が8mmに達するまで続けた。垂直応力は0～0.5kg/cm²まで0.1kg/cm²刻みで増加させた。

2.3.3 実験結果および考察

(1) ベーンせん断試験によるせん断応力・せん断変形曲線と配合の関係

コンクリートは水と空気と固体粒子の混合物であるから、練り混ぜ直後の状態は土に類似しており、そのせん断特性は飽和土や飽和粘土と同様の性質を示すものと思われる。土のせん断強度は、土粒子間の摩擦に起因する内部摩擦応力と粘着力によるが、コンクリートのせん断強度も同様に骨材間の摩擦、凝集力、粘性などに起因するものと考えられる。ベーンせん断試験は、非排水飽和粘土の強度試験用に開発されたものであるからその点コンクリート用試験機としては適していると思われる。

図2.20は、水セメント比35%のペースト、モルタル、コンクリートのせん断応力とベーンの回転角の関係を示したものである。各試料とも回転角が増加するとせん断応力は直線的に増加し、更に回転角を増加させると直線から離脱し始めせん断応力はピークに達する。この直線から離脱する点は2.2.3の(2)で述べられたように弾性限界のようであり、ビンガム流体の降伏値

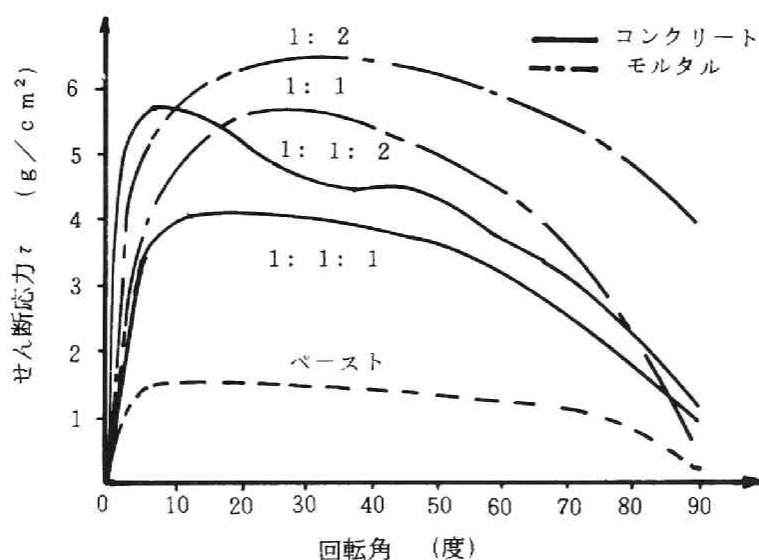


図2.20 ベーンの回転角とせん断応力の関係 (W/C=35%)

に相当する点であると考えられる。ペーストは回転角 4° 付近で最大値 $1.6\text{g}/\text{cm}^2$ を示しその後、塑性流動のように一定値を示す。この結果は、前節において述べた Powers²³⁾らの結果とほぼ同様の傾向を示している。回転角 70° 付近でせん断応力の低下がみられる。これはこの付近までの応力が単に粘性のみによるものではなく、仮想せん断面に発生する粒子間の摩擦や相互干渉を含めたずり応力であることを示している。そして、先行しているベーンによって作られた破壊面に近づくにつれて応力低下が起る。これは、図 2.21 の水セメント比 40% のペーストの応力・ひずみ図からもわかるようにペースト濃度を少し下げることによって粘性土のような丸味を帯びた応力・ひずみ図がえられ、粘性の影響が支配的になることを示すことから伺える。

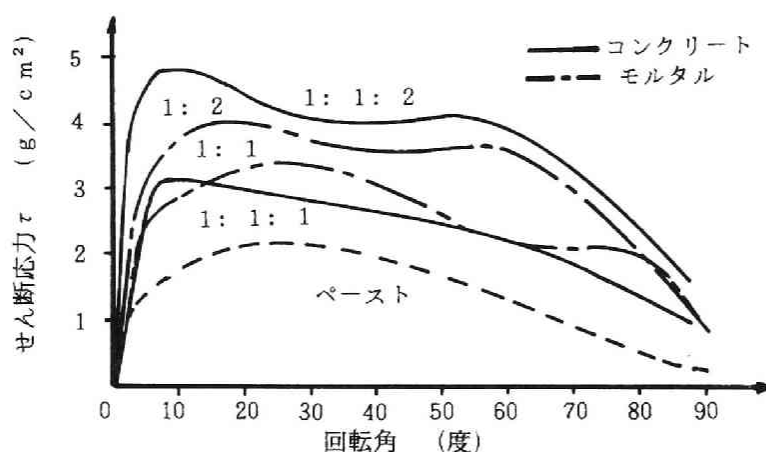


図 2.21 ベーンの回転角とせん断応力の関係 (W/C=40%)

モルタルも、ペーストと同様にみかけの弾性限界点まではせん断応力と回転角の関係が直線関係を示す。そして弾性限界点を越すとペーストのようにすぐにはピーク値を示さず徐々にピーク値に達する。せん断強度は（以下、最大せん断応力をせん断強度と呼ぶ）は砂量が多い程大きくなっており、せん断弾性係数も大きくなっている。これは、固体粒子であるセメント、砂の増加によって、粒子間の接触点数が増加することや、平均的に粒子間隔が接近することによる粘性の増加があることが原因であると思われる。また水セメント比が大きくなればせん断強度も低下する。応力・ひずみ曲線の形状をみると、水セメント比が 40% のものはダイラタントな部分を示しているが、35% の場合には、はっきりした形では表われていない。これは Powers²³⁾ のいうビスコ・ダイラタントな変形である。セメントや砂の微細な部分は水および空気を包絡したフロックを形成しており、また試料は上部を除いて容器に閉じ込められた状態にあるから、体積膨張せずに内側へ押し込まれて再配列するという考えで、35% がこの場合に相当する。40% の場合は 35% に比べて軟らかく、砂は沈降したり移動しやすく砂のダイラタンシーが支配的になってくる傾向にあり、砂セメント比が 1:1 よりも 1:2 の方が顕著になってくることが図からわかる。

コンクリートになると、モルタルの水セメント比、セメント砂比を一定とした場合には、せん

断強度は粗骨材量が多い程大きくなり、せん断弾性係数も大きくなっている。すなわち、粗骨材量が増加することでコンクリートがより硬さを増したことになる。逆に言えば、当然ではあるが粗骨量を少なくすることで、コンクリートが軟かくなる（ $1/G_i$: modulus of softness）と言える。

応力・ひずみ曲線の形状からは、粗骨材の増加により、ダイラタントな挙動を示すことがわかる。このことから、施工時において容器や型枠内でせん断を与える場合には、骨材量が多くなるとダイラタンシーの影響を受けることになり、ここで求まるせん断強度以上のせん断力が必要となる。

次に水セメント比を変化させた場合、水セメント比が小さい方がせん断強度は大きく、せん断破壊後の残留強度も大きい。表 2.3 はせん断強度およびせん断強度発生時のベーンの回転角を示したものである。表よりペーストのせん断強度の発生する角度と、モルタルやコンクリートのせん断強度発生時の回転角の間にな相関性がないことがわかる。このことは、モルタルやコンクリートのせん断強度は主に、骨材の接触点における応力伝達、骨材間の摩擦力と骨材の移動や回

表 2.3 ピーク時のせん断応力（せん断強度）と回転角

		せん断応力 (g/cm^2)	回転角 (度)
ペースト	W/C=0.35	1.6	4
	W/C=0.40	2.1	22
	W/C=0.35	5.7	22
	S/C=1.0	6.3	31
	S/C=2.0	3.3	28
	S/C=2.0	4.0	17
モルタル	W/C=0.35	4.1	12
	S/C=1.0	5.7	8
	W/C=0.40	3.1	8
	S/C=1.0	4.8	9
コンクリート	G/S=1.0		
	G/S=2.0		

転により発生するペーストないしはモルタルとの粘性抵抗力の合計であると考えることができる。

(2) 一面せん断試験によるせん断特性と配合の関係

ベーンせん断試験によってコンクリートのせん断特性はペーストの性質よりむしろ骨材によって影響されることが明らかとなった。骨材については骨材の形状や骨材表面の状態 (texture) も考えられるが骨材量が最も影響する因子である。骨材量の増加は、マトリックス部分の占める容積の低下、即ち間隙率の低下につながる。このことは、骨材骨格の有効応力とペースト部分の間隙圧とに関係がありそうである。これらの関係を明らかにするには間隙水圧の測定できる三軸圧縮試験が最も適している。しかし 2.2.2 で述べたように、三軸圧縮試験をコンクリートに適用するにはまだまだ基礎的な研究が不足しており、本研究では一面せん断試験を行った。一面せん断試験でも垂直応力を徐々に増加することである程度の傾向は把握することはできる。図 2.22, 図 2.23, 図 2.24 は、水セメント比 40% と一定にして骨材量を徐々に増加させていった場合のモルタルの応力-変位曲線である。これらの結果より、セメントペーストの濃度が一定であるモルタルのせん断強度は、砂の量が増加すれば大きくなり、垂直応力が作用しても同じ傾向を示すことがわかる。

図 2.22 のように骨材量の少ない、ゆるく詰った状態のモルタルはせん断開始後ゆっくりとせ

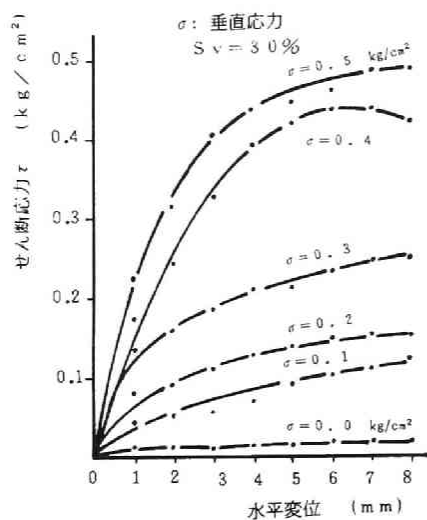


図 2.22 モルタルの一面せん断試験結果
(W/C=40%, 細骨材容積率 S_v =30%)

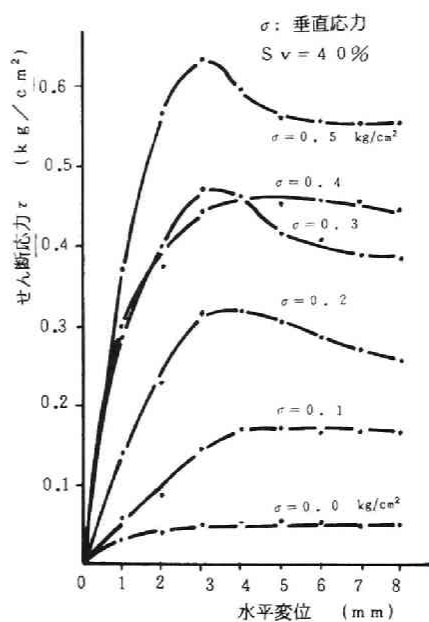


図 2.23 モルタルの一面せん断試験結果
(W/C=40%, 細骨材容積率 S_v =40%)

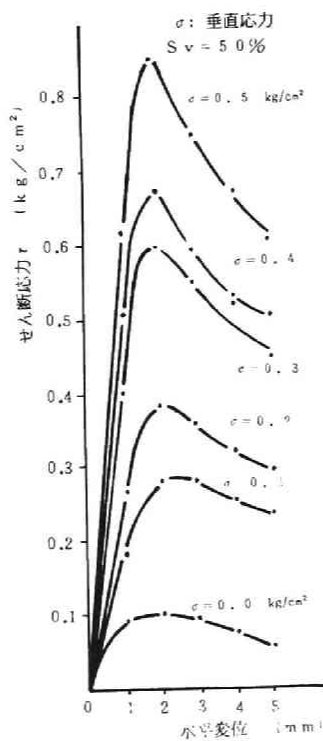


図 2.24 モルタルの一面せん断試験結果
(W/C=40%, 細骨材容積率 S_v =50%)

せん断応力が増加し、水平変位が8 mm付近になってやっとピークに達する。ところが、図2.24のように骨材の実容積が50%にもなると水平変位が2 mmのところでピークに達し、垂直応力が増してもせん断破壊変位（最大せん断応力に対応する水平変位）はあまり変わらない。

骨材の実容積を容積濃度 S_v とすると $S_v=0.3$ と $S_v=0.5$ の中間の $S_v=0.4$ は、せん断破壊変位が垂直応力を増すにつれて5 mm付近から3 mmまで移動することがわかる。以上のことから、モルタル中の骨材が少ない場合は、せん断抵抗は粘着性抵抗が主流であるが、骨材量が増すにつれてあるいは垂直応力が増すに従って、骨材粒子の接触点の増加による摩擦抵抗が主流をなしてくる。このことは図2.24のように骨材量が多い場合は、垂直応力が小さい間からダイラタンシーを示しており、垂直応力が増すに従ってせん断強度と残留強度の差が大きくなり、また図2.23のように垂直応力が増すにつれてダイラタンシーの傾向を示すなどの点からも説明できる。

各配合について、せん断強度と垂直応力の関係をプロットしてクーロンの規準 $\tau = c + \sigma \tan \phi$ で整理するとある範囲をもってばらつくので、その上限値と下限値を結んだ範囲で示すと図2.25のようになる。図中の C_1 、 C_2 は、粘着力の上限値と下限値で、 ϕ_1 、 ϕ_2 は内部摩擦角の

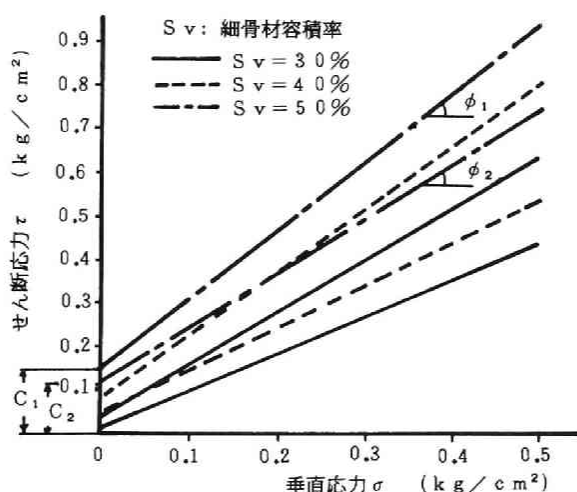


図2.25 モルタルの一面せん断試験結果 (W/C=40%)

上限値および下限値である。またクーロンの直線が横軸を切る点を凝集力（負の応力） p' とし、上限値および下限値をそれぞれ p'_1 、 p'_2 とする。そして垂直応力が $\sigma = 0$ のときのせん断応力の平均値を C_0 としてまとめたのが表2.4である。 C_0 をみかけの粘着力と考え、骨材量が増すにつれて、みかけの粘着力は増加する傾向にある。粘着力も同様に骨材量の増加と共に増加するが、 S_v が40%から50%になると急に大きくなっている。また内部摩擦角も同様のことが言える。これは、ダイラタンシーによる体積膨張によって垂直応力の一部が消費されたためであって、そのエネルギー補正を行うことができればこのような急激な増加はないものと思われる。しかし実際のコンクリート工事では、練り混ぜ時におけるミキサーや打設時における型枠などの

表 2.4 セン断試験結果 (モルタル, W/C=40%)

細骨材の容積濃度 (Sv)		0.30	0.40	0.50
$\sigma = 0$ におけるせん断 応力 (Co)		0.019	0.057	0.135
粘着力 (kg/cm ²)	C ₁	0.045	0.067	0.155
	C ₂	0.015	0.047	0.110
内部マサツ角 (度)	ϕ_1	44	50	52
	ϕ_2	35	38	47
凝集力* (kg/cm ²)	p ₁	0.047	0.060	0.120
	p ₂	0.021	0.056	0.100

* $p' = C / \tan \phi$

容器内でせん断が加えられることが多く、従ってこのようなダイラタンシーの影響を含んだせん断特性を示していると思われるので現象的には傾向を十分表わしている。凝集力 p' は $p' = c / \tan \phi$ で計算され、粘着力および内部摩擦を含んでいるためせん断特性を表わす上で一語で表現でき便利である。本研究の結果においても凝集力は粘着力や内部摩擦角と同様の傾向を示した。内部摩擦角は三軸圧縮試験で報告されている結果¹⁰⁾より幾分大き目の値が出ているが、これは一面せん断試験の特徴である応力分布が一様でないことに起因するものであろう。

本研究では試験の容量の関係でモルタル実験となったがモルタルも最大寸法 5 mm のコンクリートであるとした Tassios⁸⁾の実験報告と同じ考えのもとに行っており、コンクリートについても同様の結果となると考えている。

2 3 4 ま と め

フレッシュコンクリートのせん断特性はせん断速度、排水条件、試料の容量などの試験条件の影響を受ける。また応力-ひずみ関係一つを取ってみてもダイラタンシーの発生によるエネルギー補正をどうするかなど測定上の改良すべき点もまだ多く残されている。しかし、ここで得られた粘着力や内部摩擦角は将来型枠に対する側圧の計算などへの応用も可能であろう。

本研究において明らかとなった点をまとめると次のようになる。

- (1) フレッシュコンクリートにもみかけのせん断弾性係数や弾性限界が存在する。これらの値はペーストの水セメント比が増加すると低下し、また骨材量を増すと増加する。
- (2) フレッシュモルタルおよびコンクリートに存在するみかけのせん断破壊ひずみはペーストのみかけのせん断破壊ひずみとの相関性は低い。
- (3) フレッシュモルタルおよびコンクリートのせん断強度は、骨材粒子によって形成された構造系の弾性抵抗力、粒子間の摩擦力、骨材の移動や回転時に発生する粘性抵抗力の合計として生じる。従って骨材量、垂直応力、ペーストの濃度に影響される。
- (4) 骨材量または垂直応力の増加によりダイラタンシーの影響が大となる。
- (5) フレッシュモルタルのせん断変形特性として求めた粘着力や内部摩擦角はペースト濃度を一定とした場合には骨材の占める容積の増加とともに増加する傾向にある。粘着力や内部摩擦角を用いて型枠への側圧の計算をすることは将来において可能である。
- (6) ベーンせん断試験は実験方法が簡便であり、せん断応力・ひずみ曲線から求めるみかけの

弾性限界、せん断弾性係数、せん断強度などの特性値を得ることができる。これらの特性値は例えば弾性限界とせん断弾性係数の大きい吹付用のモルタルやコンクリートであれば跳返り量の低減やだれの防止と関連づけられるし、せん断弾性係数やせん断強度の経時的増加を測定すれば打継ぎや型枠移動時間の決定などへの応用が考えられる。

2.4 結 語

フレッシュコンクリートの動的問題を扱う上で重要である基礎的な資料を得ることを目的としてペースト、モルタル、コンクリートのせん断強度およびせん断変形特性について実験的に研究した結果をまとめると次のような知見を得た。

(1) フレッシュペーストのせん断特性はセメント量が多くなることで分子間引力は大となり凝集による粒子の接触点数の増加からせん断強度、みかけのせん断弾性係数も増加する。したがってセメント濃度が同一であっても界面活性剤によりセメント粒子を分散させることによってせん断強度およびみかけのせん断弾性係数も分散効果に応じて低減する。

(2) フレッシュモルタルおよびコンクリートのせん断特性はペーストと違い、コロイド領域から相当離れた骨材粒子が大半であることから、骨材粒子が形成する構造の弾性成分や摩擦力、骨材の移動や回転に対する粘性抵抗力の合計によって決まる。したがって骨材量や骨材の充填状態などの骨材に関する要因に主に影響される。しかし、ペーストの水セメント比を大きくすることも粘性抵抗力を低減させ、せん断強度やみかけのせん断弾性係数を低くする効果はある。また垂直応力の増加は摩擦力を増加させるだけでなく骨材の充填状態も密にさせる効果があり、骨材量を増加させたのと同様のせん断特性を示す。即ち、打設速度の速い場合などは打設高さによってせん断特性が違ってくる。

(3) フレッシュペースト、モルタルおよびコンクリートのせん断強度やみかけのせん断弾性係数は時間の経過と共に増加するが、この増加曲線は温度一定であれば水セメント比、混和剤の種類、混和剤量などによって影響される。これらの傾向はスランプ試験など従来の試験方法によっても把握することはできるが、従来の試験方法は相対比較によっており物理量で表わされておらず、また適用範囲はかぎられたものである。しかし本研究で用いた回転粘度計、ベーンせん断試験、一面せん断試験などの方法は一部測定法の改良の余地はあるものの物理量によってこわばりの程度を表現することができた。

(4) フレッシュコンクリートは粗骨材量が多くなるか、垂直応力が大きくなるとダイラタンシーの傾向を示す。

(5) フレッシュモルタルは水セメント比を一定にした場合に、骨材量の増加によって粘着力、内部摩擦角は大きくなる。

参 考 文 献

- 1) ACI Committee 309, ; "Behavior of Fresh Concrete During Vibration" ACI Jour. committee report, no. ACI 309 1 R-81, 1981 (36-53)
 「著者注：フレッシュコンクリートの振動に関する主な文献が63編参考文献に記載されている。」
- 2) Walz. K. : "Rüttelbeton", Wilhelm Ernst & Shon, 1948.
- 3) 神山 一, 遠藤博之 ; "振動締固め中の軽量コンクリート振動伝ば性状", 材料, 第18巻, 第185号, 昭和44年2月 (115-120)
- 4) 西林新蔵, 矢村 潔, 井上正一, 吉野 公 ; "振動下におけるフレッシュコンクリートの挙動に関する基礎的研究" 材料, 第29巻, 第318号, 昭和55年3月 (247-252)
- 5) 米倉重州夫 ; "高性能減水剤を用いたコンクリートの振動締固めに関する基礎的研究" セメント技術年報 Vol. 34. 昭和55年 (374-377)
- 6) 土木学会 ; "フレッシュコンクリートに関する文献抄録集" コンクリート施工研究小委員会編, 昭和59年2月 (327-384)
 「著者注：振動に関する国内外の主な論文20編が抄録されている」
- 7) L'Hermite, R. ; "Recent reseavch on concrete", Annales des Travaux publics des Belgique, Vol. 50, No.5, 1949 (481-512) ; G. H. Tattersall 'The workability of concrete' A Viewpoint Publication, Cement and Concrete Assosiation, 1978 (20-22)
- 8) Tassios, T. P. ; "Plasticity and cohesiveness of fresh concrete." Proc. of a RILEM Seminar, Leeds. 1973. Vol. 1 (1.3-1 to 1.3-36)
- 9) Tattersall, G. H.; "The workability of concrete" A Viewpoint Publication, Cement and Concrete Assosiation, 1978 (22)
- 10) Ritche, A. G. B.; "The triaxial testing of fresh concrete" Mag of Concrete Research. Vol 14, No.40. 1962 (37-42)
- 11) Vzamaka, O. J.; "A concrete rheometer and its appctication to a rheological study of concrete mixes." Proc. of the 6th International Congvess of Rheology, Lyons, 4th-8th 1972 Vol. 4. (233-235)
- 12) 村田二郎 ; "まだ固まらないコンクリートのレオロジーに関する基礎的研究" コンクリート工学 Vol. 15, No.1, 1977 (25-34)
- 13) 角田 忍, 明石外世樹 ; "フレッシュコンクリートのせん断変形特性" セメント技術年報 Vol. 35, 昭和56年 (226-229)
- 14) 西林新蔵, 木山英郎, 阪田憲次 "フレッシュコンクリートのレオロジー的性質に関する基礎的研究" 土木学会第28巻, 第30回年次学術講演会概要集V部, 昭和49年, 50年 (79-80, 103-104)
- 15) 越川茂雄, 中村憲治 ; "まだ固まらないコンクリートの三軸圧縮試験について" 土木学会第30回年次学術講演会概要集V部, 昭和50年 (77-78)
- 16) 飯田一彦, 五十嵐孝之, 鈴木明人 ; "フレッシュコンクリートの大型三軸試験" 土木学会, 第38回年次学術講演会概要集V部, 昭和58年 (183-184)
- 17) 角田 忍, 明石外世樹 ; "回転粘度計によるペーストおよびモルタルのせん断特性" 土木学会, 第36回年次学術講演会概要集V部, 昭和55年 (354-355)
- 18) 村田二郎, 岡田 清著 "フレッシュコンクリートのレオロジー・コンクリートの弾性とクリープ" 山海堂, 昭和55年刊 (48-30)
- 19) 土質工学会編 ; "土質試験法" 土質工学会, 昭和55年 (541)
- 20) 奥村忠彦, 石塚敬之, 金沢克義 ; "若材令における注入モルタルのせん断特性について" 土木学会, 第

30回年次学術講演会概要集V部、昭和50年（89-91）

- 21) Ritche, A. G. B.; "The Vane method of measuring the mobility of fresh concrete" paper presented to Conference of British Society of Rheology, Sheffield, 1967.
- 22) Legrand, C.; "Contribution à l'étude de la rhéologie du béton frais." Matériaux et constructions, Vol. 5, No.29. 1972 (253-295)
- 23) Powers, T. C.; "The properties of fresh concrete." London, Jhon Wiley, N. Y. 1968 (477-482)
- 24) 前掲の 23) と同じ
- 25) Lambe, T. W.: "A mechanistic picture of shear strength in clay "Proc. ASCE, Res. Conf. on Shear Strength of Cohesive Soils. 1960.
- 26) 角田 忍, 明石外世樹; "フレッシュコンクリートのせん断変形特性" セメント技術年報, Vol. 35, 昭和56年 (226-229)

第 3 章 振動下におけるフレッシュ コンクリートの動的挙動に 関する研究

第3章 振動下におけるフレッシュコンクリートの動的挙動に関する研究

3.1 概 説

ミキサーによって練り混ぜられたコンクリートは運搬中、打設作業中や仕上げ作業中に種々の振動を受ける。また養生中においても車輛の走行振動、工場などの機械振動、場合によっては地震などといった振動を受けることもある。このようにコンクリートがまだ固まらない状態において受ける振動は、気泡-水-セメント-骨材粒子といった比重のまったく違う固・液混合物に振動エネルギーが与えられる訳であるから、エネルギーの大きさ、波長などの動的要因によって粒子の沈降・共振現象による液状化現象など様々な挙動を示す。しかし現在までに行われて来た多くの研究は、振動締固め、表面仕上げについて振動機の加速度、振幅、振動数などとコンクリートの密度との関係を明らかにすることに重点が置かれており、言換えれば適度の材料分離を起させるにはどのような条件を満せば良いのかという研究である。¹⁾

本章では、フレッシュコンクリートを正弦振動させた場合の挙動について、レオロジー的に評価し、物理量として振動中のコンクリートの性質を捕え、振動条件によってコンクリート品質がどのように影響を受けるかを明らかにすることによって合理化施工への基礎資料を得ようとするものである。

3.2 振動式回転粘度計による振動下の挙動

3.2.1 はじめに

前章において述べたように、ペースト、モルタル、コンクリートにせん断変形を与えると、変形の小さい間は応力とひずみの間に直線関係があり、この直線から逸脱した後、最大せん断応力に達する。この最大せん断応力以後の試料は構造破壊を起して流動を始める。²⁾モルタルやコンクリートの流動抵抗は粘性とダイラタンシーの影響を含んだ粘-ダイラタント流動 (Visco-dilatant flow) と呼ばれるもので³⁾骨材間の干渉が強く影響する。ペーストについては最初構造破壊によって不動水が解放され粘度が減少し、せん断速度に応じた構造の破壊と再生と釣合った状態でのせん断抵抗をするチクソトロピーな性質を示すが、時間の経過と共に水和の進行、沈降による粒子の巨大化や水分の蒸発などによってレオベキシーの性質を示すようになる。従って、ペーストのレオロジー定数はチクソトロピー性とレオベキシー性の合計として経時変化する。⁴⁾このようにペースト、モルタル、コンクリートは連続的なせん断変形を受けると複雑な挙動をする。本節では試料の構造破壊を避け、試料が本来持っている粘弾性的性質を微小振幅の繰り返しせん断によって得ようとするものであり、ペースト、モルタル (コンクリートの一種と考えている) を前章で用いた回転粘度計の外円筒を左右に振動させ、動的レオロジー定数と配合要因との関係についての基礎的実験をし、考察を行った。

3 2 2 振動式回転粘度計の理論

コンクリートのように水—セメント—骨材系の本質的にすべる性質を持った系であっても、ひずみ量を小さくしすべる前の状態での挙動を追跡することはできる。⁵⁾ すべりや構造破壊が起る前の試料を粘弾性液体と仮定すると、高分子系の粘弾性液体のレオロジー測定法としてしばしば用いられる振動式回転粘度計を適用することができる。解析方法としては、Marcovitz⁶⁾の解析方法が用いられる。図3-1の二重円筒粘度計においていま外円筒に角速度 ω の正弦的変位を与えたとき、外円筒の振幅 θ_{R_2} と内円筒の振幅 θ_{R_1} の間には次のような関係がある。

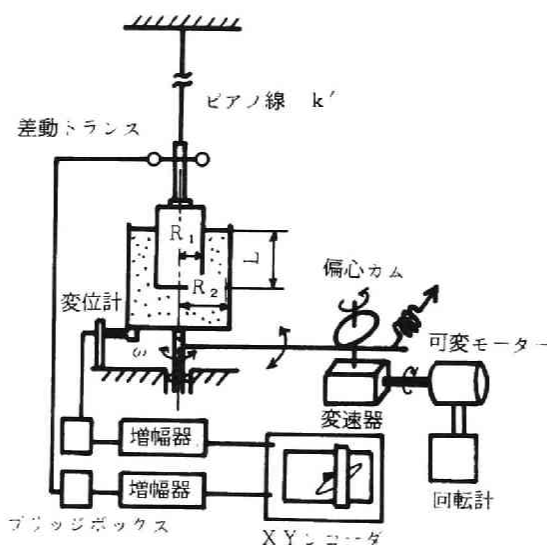


図3-1 振動式回転粘度計装置図

$$\begin{aligned}
 \frac{\theta_{R_2}}{\theta_{R_1}} = & 1 + \frac{i}{\eta^*} \left[\frac{I\omega^2 - k}{4\pi L \omega} \cdot \frac{R_2^2 - R_1^2}{R_1^2 \cdot R_2^2} + \frac{\omega \rho}{8} \cdot \frac{(R_2^2 - R_1^2)^2}{R_2^2} \right] \\
 & - \frac{1}{\eta^*} \left[\frac{(I\omega^2 - k)\rho}{32\pi L} \left(4 \ln \frac{R_1}{R_2} + \frac{R_2^2}{R_1^2} - \frac{R_1^2}{R_2^2} \right) \right. \\
 & + \frac{\omega^2 \rho^2}{192 R_2^2} \left\{ (R_2^2 - R_1^2)(R_2^4 - 5R_2^2 R_1^2 - 2R_1^4) + 12R_2^4 R_1^2 \ln \frac{R_2}{R_1} \right\} \Big] \\
 & + \frac{i}{\eta^{*3}} \left[\frac{(I\omega^2 - k)\omega \rho^2}{768\pi L R_2^2 R_1^2} \left\{ 12R_2^2 R_1^2 (R_2^2 + R_1^2) \ln \frac{R_2}{R_1} \right. \right. \\
 & - (R_2^2 - R_1^2)(R_2^4 + 10R_2^2 R_1^2 + R_1^4) \Big\} \\
 & - \frac{\omega^3 \rho^3}{9216 R_2^2} \left\{ 24R_2^2 R_1^2 (3R_2^2 + 2R_1^2) \ln \frac{R_2}{R_1} \right. \\
 & + (R_2^2 - R_1^2)(R_2^6 - 11R_2^4 R_1^2 - 47R_2^2 R_1^4 - 3R_1^6) \Big\} \Big] + \dots \quad (3 \cdot 1)
 \end{aligned}$$

ここで、 I ；内円筒の慣性モーメント、

k ；ピアノ線のねじれ定数

R_1 ；内円筒の半径、

R_2 ；外円筒の半径

L ; 試料への内円筒の浸入長, ρ ; 試料の比重

η^* ; 試料の複素粘性率, $i = \sqrt{-1}$

本研究では、外円筒に $\theta_{R2} = \theta_0 e^{i\omega t}$ なる振動変位を与え、内円筒の動きを観測するものとしている。

粘弾性体において応力は変位より ϕ ($0^\circ < \phi < 90^\circ$) だけ位相が速くなる。従って内円筒の振幅は $\theta_{R1} = A e^{i(\omega t + \phi)}$ であるから、

$$\frac{\theta_{R2}}{\theta_{R1}} = \frac{\theta_0 e^{i\omega t}}{A e^{i(\omega t + \phi)}} = \frac{1}{p} e^{-i\phi} = \frac{1}{p} (\cos\phi - i\sin\phi) \quad (3 \cdot 2)$$

ここで、 p ; 両円筒の振幅比

ϕ ; 位相角差

(3・1) および (3・2) 式より

$$\begin{aligned} 1 - \frac{1}{p} \cos\phi + \frac{i}{p} \sin\phi + \frac{i}{\eta^*} \left[(A_1 + B_1 \rho) \omega - \frac{C_1}{\omega} \right] \\ - \frac{1}{\eta^{*2}} \left[(A_2 + B_2 \rho) \rho \omega^2 - C_2 \rho \right] + \dots = 0 \end{aligned} \quad (3 \cdot 3)$$

ここで、

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{I(R_2^2 - R_1^2)}{4\pi L R_1^2 R_1^2}, \quad A_2 = \frac{I}{32\pi L} \\ B_1 &= \frac{(R_2^2 - R_1^2)^2}{8R_2^2}, \quad B_2 = \frac{1}{192R_2^2} \left\{ (R_2^2 - R_1^2)(R_2^4 - 5R_2^2 R_1^2 - 2R_1^4) \right. \\ &\quad \left. + 12R_2^2 R_1^2 \ln \frac{R_2}{R_1} \right\} \\ C_1 &= \frac{kA_1}{I}, \quad C_2 = \frac{kA_2}{I} \end{aligned}$$

で求められる形状係数である。

本研究では $\omega < 10 \text{ sec}^{-1}$ として $1/\eta^{*2}$ 以下の項を無視することにする。よって (3・3) 式は

$$1 - \frac{1}{p} \cos\phi + \frac{i}{p} \sin\phi + \frac{1}{\eta^*} \left[(A_1 + B_1 \rho) \omega - \frac{C_1}{\omega} \right] = 0 \quad (3 \cdot 4)$$

ここで $x = \frac{1}{p} \sin\phi$, $y = \frac{1}{p} \cos\phi - 1$ とおくと

$$(xi - y)\eta^* = i \left[\frac{C_1}{\omega} - (A_1 + B_1 \rho) \omega \right]$$

両辺に $-(xi + y)$ を乗じて

$$(x^2 + y^2)\eta^* = (x - yi) \left[\frac{C_1}{\omega} - (A_1 + B_1 \rho) \omega \right]$$

ここで $\eta^* = \eta' - \eta''i$ とおくと

$$(x^2 + y^2)(\eta' - \eta''i) = \left[\frac{C_1}{\omega} - (A_1 + B_1 \rho) \omega \right] (x - yi)$$

これを整理して

$$\begin{cases} \eta' = \frac{\left[\frac{C_1}{\omega} - (A_1 + B_1 \rho) \omega \right]}{x^2 + y^2} \cdot x \\ \eta'' = \frac{\left[\frac{C_1}{\omega} - (A_1 + B_1 \rho) \omega \right]}{x^2 + y^2} \cdot y \end{cases} \quad (3 \cdot 5)$$

ここで複素粘性率の実数部は動的粘性率 (dynamic viscosity), 虚数部に ω を乗じたものを動的弾性率 (dynamic modulus) と呼んでいる。また動的粘性率に ω を乗じたものを動的損失と呼ぶ。

$$\begin{cases} \text{動的弾性率: } G' = \omega \eta'' \\ \text{動的損失: } G'' = \omega \eta' \end{cases} \quad (3 \cdot 6)$$

(3・4) 式における p および ϕ は内円筒および外円筒の振動を X-Y レコーダによって記録させ図 3.2 のようなリサージュ円を描かし次式により求める。

$$p = \frac{H(\text{内筒のゆれ})}{V(\text{外筒のゆれ})}, \quad \sin \phi = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{(s)}{[s]} \quad (3 \cdot 7)$$

ここで (s) : リサージュ円の面積

[s] : (s) に外接する長方形の面積 [s] = H · V

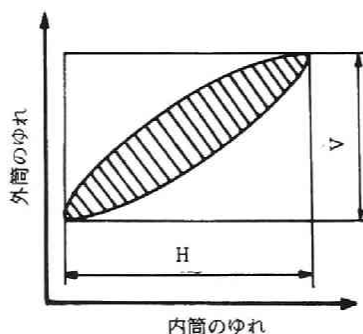


図 3.2 リサージュ図形

3.2.3 実験方法

実験に用いたセメントは普通ポルトランドセメント (日本社), 骨材は豊浦標準砂 ($\rho = 2.63$) を使用した。配合は, 水セメント比を 30%, 35%, 40%, 45%, 50%, 55% 骨材セメント比を 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 としてセメントの濃度および骨材量を変化させた。

実験に用いた振動式回転粘度計は図 3.1 に示すように外円筒回転型の回転粘度計の外円筒の軸に棒を付け偏心カムを回転させることによって左右の繰返し振動をするようにしたものである。内円筒の半径 R_1 および外円筒の半径 R_2 は各々 38.5mm, 53.0mm で材質は鋼製とした。トーションワイヤーとしては直径 2.3~5 mm, 長さ 67~69cm の範囲のピアノ線を試料の硬さに応じて

取り換えた。外円筒の振幅は偏心カムを換えることにより変わり、振動数は可変モータの回転数を変えることにより変化させた。

試験方法は、先ず JIS R 5201 (セメントの物理試験) 用モルタルミキサーにより 1 分間空練り後注水し 3 分間練り混ぜた試料を粘度計内に空隙が残らないように詰めた後、外円筒を一定振幅、一定振動数で振動させる。外円筒および内円筒のゆれを X-Y レコーダによって記録し、リサージュ円を描かせる。リサージュ円の面積 (S) はプランメータで読み取りリサージュ円に外接する長方形の面積 [S] は図 3.2 $[S] = H \cdot V$ によって計算される。動的弾性率 G' 動的損失 G'' 動的粘性率 η' は (3・4) (3・5) (3・6) (3・7) 式から計算によって求めた。

3.2.4 実験結果および考察

(1) リサージュ円

振動実験 (Oscillation test) の結果、ペーストについてもモルタルについても図 3.2 に示すようなほぼ楕円形のリサージュ図形が得られた。図は横軸に内筒のゆれ (トルクであるから応力に置き換えて考えられる)、縦軸に外筒のゆれ (振幅であるからひずみと考えられる) をとったもので応力-ひずみ関係に相当する。

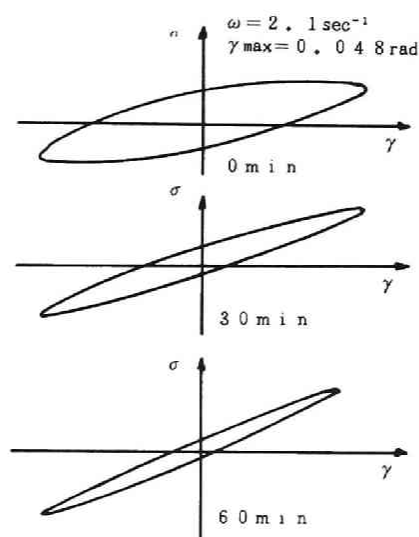


図 3.3 モルタルのリサージュ図形の経時変化 (S/C=2.0, W/C=45%)

図 3.3 は水セメント比 45%, セメント骨材比を 1/2 のモルタルを代表例として挙げている。図では、モルタルが練り混ぜ直後において粘性的性質を多く有していても、60 分経過するとリサージュで囲まれる面積は小さくなり、楕円の傾きも徐々に急になる現象を表わしており、モルタルが経時的に弾性体としての性質を発現することがわかる。モルタルのリサージュ図形が楕円形を示すことは Bache⁷⁾ によっても確認されているが、著者らの実験結果では配合によっては図 3

4, 図3.5のような形状を示すものもあり, 振動振幅を大きく取りすぎると写真3.1のようなすべり又はチクソトロピーの影響と思われる形状を示した。

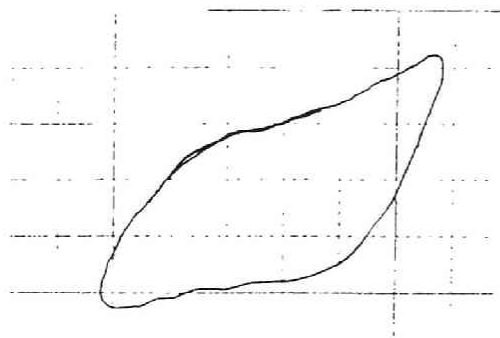


図3.4 非線形リサージュ例
(高性能減水剤添加率0.6%, $\omega = 2 \text{ sec}^{-1}$)

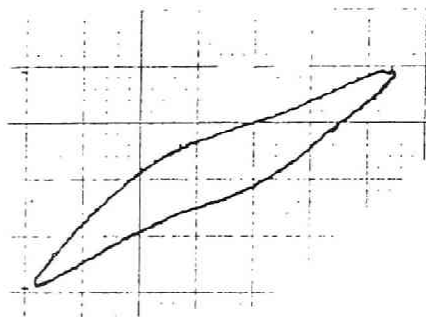


図3.5 非線形リサージュ例
(減水剤添加率0.25%, $\omega = 1 \text{ sec}^{-1}$)

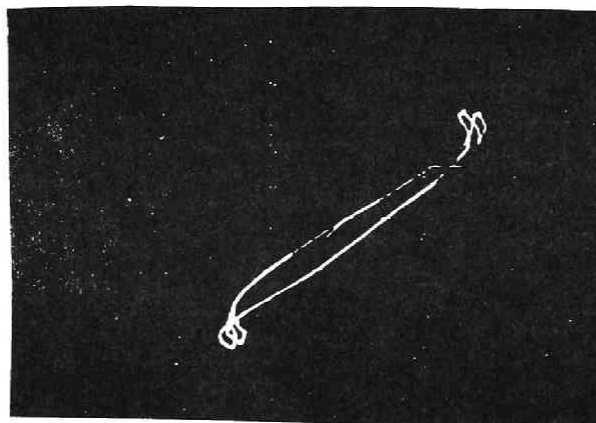


写真3.1 ひずんだリサージュ図形 ($W/C=40\%$)

ペーストについては Powers⁸⁾, 梅屋⁹⁾の報告がある。Powers は水セメント比24%, ひずみ速度 0.08 rad/sec としての実験結果が図3.6のような曲線を描くとしており, 梅屋は水セメント比77%, 角周波数 0.0523 s^{-1} の条件で図3.7のようなリサージュ図形を得ている。図3.8は著者の実験結果の一例である。図3.9は, 種々の分散系のリサージュ図形である。図において試料が線型粘弾性体であれば楕円形となるが非線型粘弾性体のものはゆがんだ図形になる。図3.10において, ペーストはある程度振動させてやると楕円形となり線型粘弾性体としての解析が可能であることがわかった。また振動回数によって勾配が変化する現象を示した。すなわち繰返しせん断を受けることによって軟らかくなるチクソトロピー軟化と配合によっては水和の促進によって硬くなるレオペキシー硬化の影響の表れである。このようにリサージュ図形を描かせ観測することは, コンクリートの性質が繰返し荷重によって経時的に変化して行く様子や配合の違いで粘弾性的性質が違ふことを理解する上で有用である。

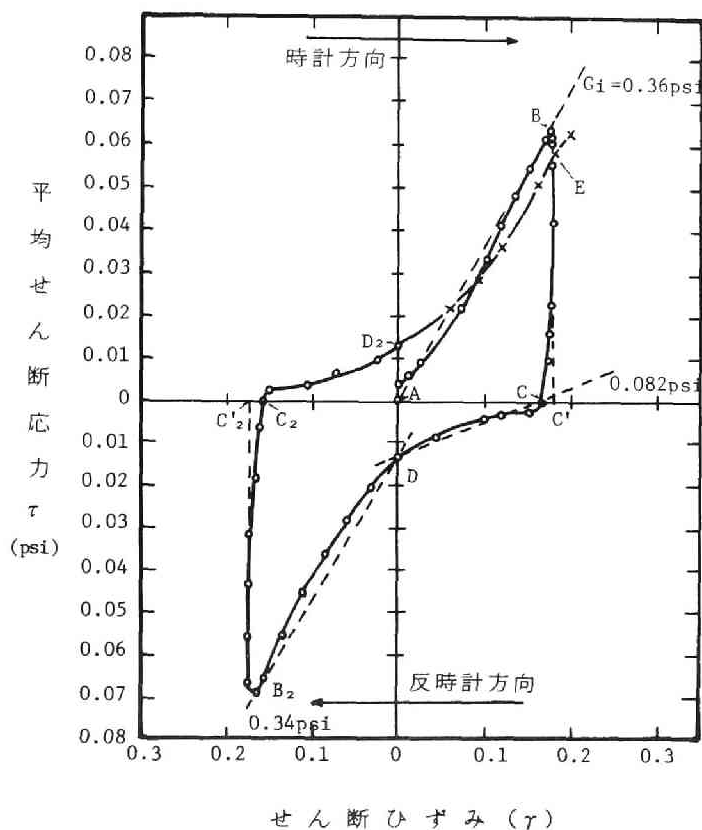


図 3.6 セメントペーストの繰返し応力-ひずみ図
($W/c=0.24$, $\gamma=0.08\text{rad/sec}$) Powers による³⁾

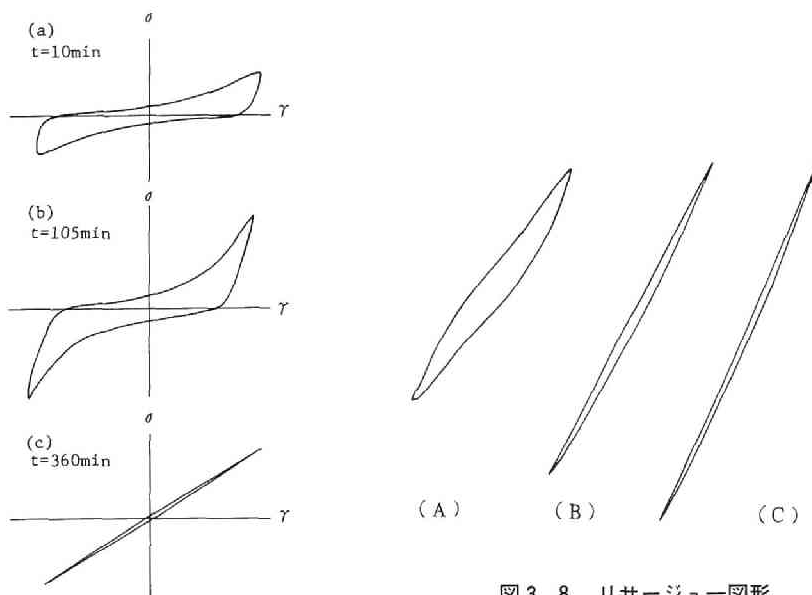


図 3.7 セメント-水系の振動実験における⁵⁾
リサージュ図形の変化 (梅屋による)

図 3.8 リサージュ図形
($W/c=0.50$, $S/c=1.5$, $WRA=0.5\%$,
A: 0分, B: 30分, C: 60分)

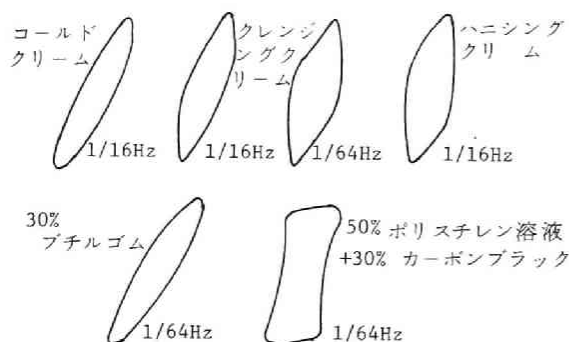
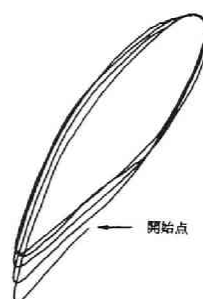
図 3.9 種々の分散系のリサージュ図形 (小野木)¹⁰⁾

図 3.10 リサージュ図形の変化

(2) 振幅および端末効果の検討

今回のように実験に回転粘度計を用いる場合に内円筒底面の影響を考慮する必要がある。内円筒と外円筒の間隔を数種類とり (3・4)～(3・7) 式により動的弾性率 G' および動的粘性率 η' を計算し、底面からの距離との関係を示したのが図 3.11 である。図より円筒は底面より

3.5cm 以上離しておく必要がある。底面の影響を取り除くには、上述のような浸潤長を変化させて影響が無くなる距離を調べる方法の他にも底面を円錐形にするとか、底面に空気を留め摩擦を取る方法等いくつかの方法がある。しかし、この方法が最も簡便で確実であると考えられるので、以後はこの方法によって実験を進めた。次に (1) において、リサージュ図形を描く場合、図 3.2 のような楕円形をしていないと非線型の問題となり解析をむずかしくする。すなわち粘弾性の性質が線型であるためには第 2 章において論義された降伏値以下である必要がある。

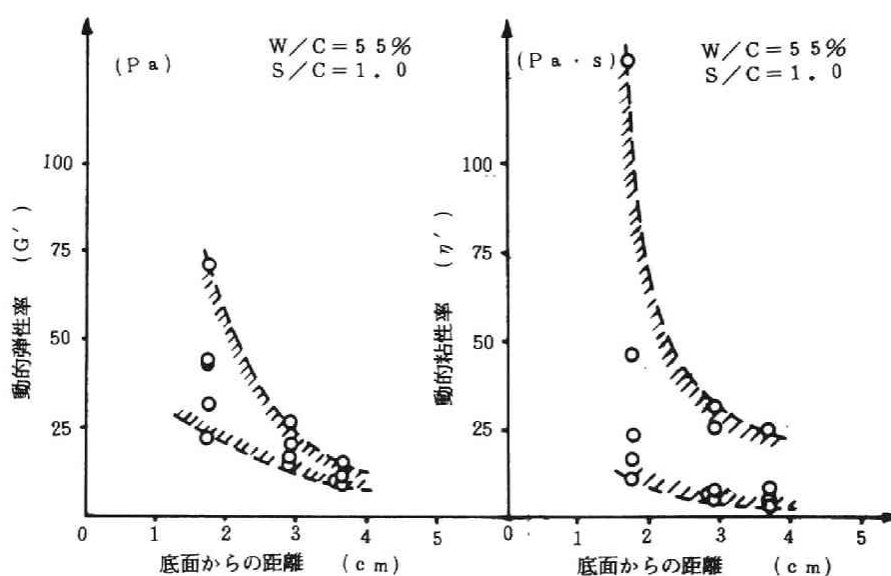


図 3.11 レオロジー定数と底面からの距離の影響

従って、応力—ひずみ図から配合によって多少の差があっても最大振幅が 3° 以内であればほぼ線型として取扱えることがわかった。

実際に回転粘度計によって求めたリサージュ図形は 4° 程度までは図3.2のような楕円形になった。図3.12, 図3.13は水セメント比を3種類に変化させたペーストに $\omega=0.67\text{sec}^{-1}$ なる振動数で振幅を 0.0566rad (3.25°), 0.0755rad (4.32°), 0.1038rad (5.95°)の3種類について、振幅と動的弾性率 G' 、動的損失 G'' の関係を表わしたものである。動的弾性率 G' 、動的損失 G'' は振幅が $\gamma=0.0566\text{rad}$ (3.25°)のときは、水セメント比が大きくなれば減少することを示している。しかし振幅が大きくなると (4° 以上)、楕円形がひずみ非線型領域に入るためにこの傾向はみられなくなる。

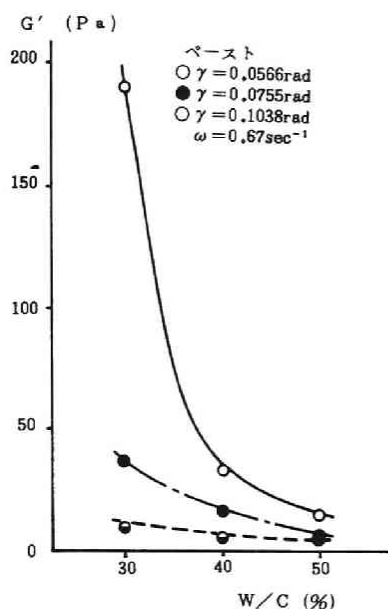


図.12 動的弾性率 G' と振幅の関係(ペースト)

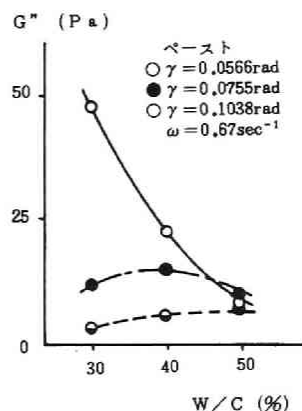


図3.13 動的損失 G'' と振幅の関係(ペースト)

以上の結果から振動実験においては、振幅角を 4° 以下にとって、せん断エネルギーの試料への伝達を行うことによって試料の内部構造の力学的性質を知ることが可能となる。一方水セメント比が30から50%程度のペーストでは 4° 以上の振幅角によって振動させると構造破壊によってレオロジー定数は低下し液状化することが考えられる。

(3) 動的レオロジー定数と周波数依存性

ペースト、モルタル、コンクリートに構造破壊が発生するひずみ以下の振幅で正弦振動が加わると、線型粘弾性振動をする。粘弾性体に正弦ひずみ $\gamma = \gamma_0 e^{i\omega t}$ を与える場合、応力も正弦応力を生じる。このときの応力—ひずみ関係式は

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= G^*(\omega) \gamma = \{G'(\omega) + iG''(\omega)\} \gamma \\ \gamma &= \gamma_0 e^{i\omega t} \end{aligned} \right\} \quad (3 \cdot 8)$$

で与えられる。ここに G^* は複素弾性率である。

ここで $G'(\omega)$ の $\omega \rightarrow \infty$ とした場合をガラス弾性率 G_g , $\omega \rightarrow 0$ とした場合を平衡弾性率または静的弾性率 G_e と呼ぶ。この場合 $d\gamma/dt = i\omega t$ であるから、これを書きなおして

$$\sigma = \left\{ \frac{G''(\omega)}{\omega} - i \frac{G'(\omega)}{\omega} \right\} \frac{d\gamma}{dt} \quad (3 \cdot 9)$$

上式の $\{ \}$ 内を $\eta^*(\omega)$ とすればニュートン粘性式に類似する。

図 3.14 は無定形高分子の $G'(\omega)$, および $G''(\omega)$ と周波数の関係を表わしたものである。

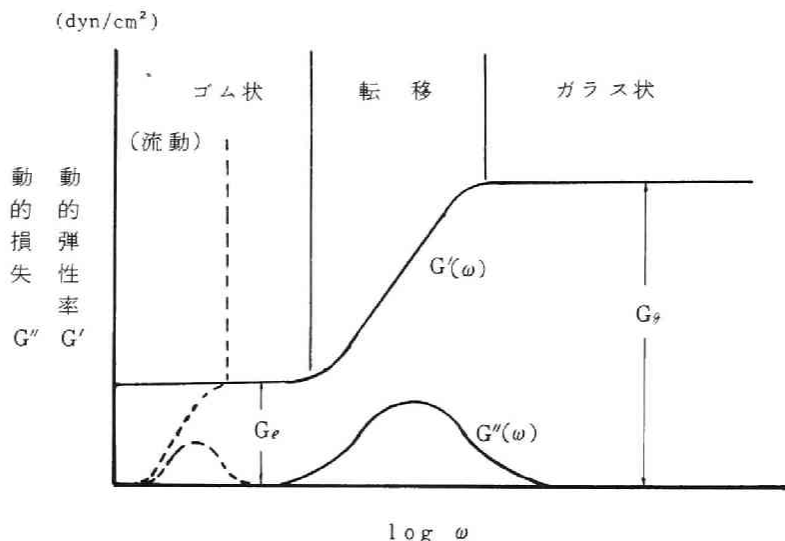


図 3.14 無定形高分子の動的弾性率 G' と動的損失 G''

無定形高分子は橋かけを持たず、分子間が連結されていないので低周波数領域においては図中の破線のように流動域への転移領域となる。

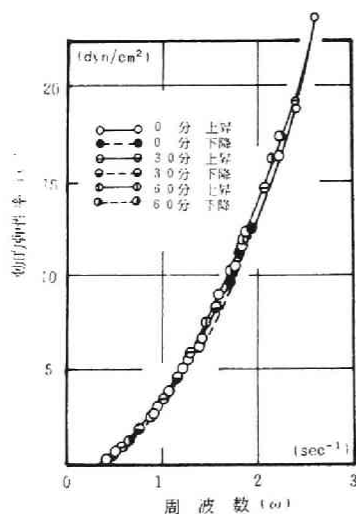


図 3.15 ペーストの動的弾性率 G' の周波数及び経過時間の影響 ($W/C=30\%$)

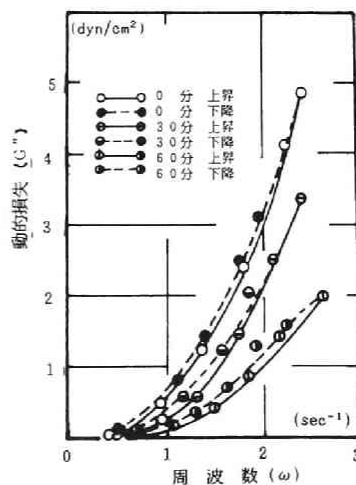


図 3.16 ペーストの動的損失 G'' の周波数及び経過時間の影響 ($W/C=30\%$)

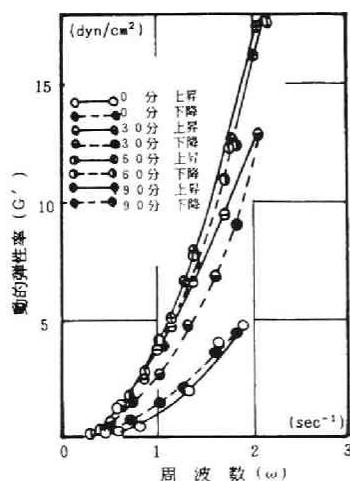


図 3.17 ペーストの動的弾性率 G' の周波数及び経過時間の影響 ($W/C=45\%$)

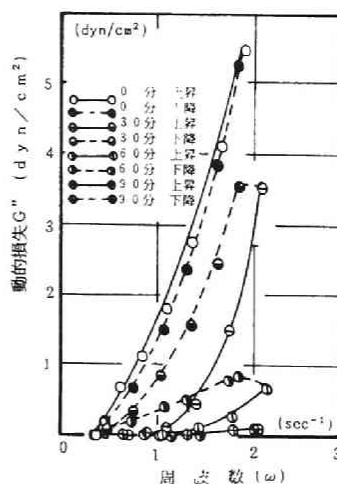


図 3.18 ペーストの動的損失 G'' の周波数及び経過時間の影響 ($W/C=45\%$)

ペーストやモルタルは、無定形高分子のように固体粒子どうしが分子間引力によって吸着しあっている状態であるからこれに類似した周波数依存性を示すはずである。図 3.15 から図 3.18 まではペーストについての結果である。実験装置による解析上 ($\omega < 10 \text{ sec}^{-1}$) の都合で非常に狭い周波数領域となっているが動的弾性率 G' および動的損失 G'' とも周波数の増加に伴って曲線的に増加している。図における $G'(\omega)$, $G''(\omega)$ は、いずれも ω が $0.2 \sim 0.3 \text{ sec}^{-1}$ 付近で非常に小さい値となって、それ以下の長いタイムスケールの実験では試料は流動することを示している。曲線の形状からフレッシュペーストの動的レオロジー定数は周波数依存性を有しており、無定形高分子の低周波数領域に類似することが判明した。次に個々の動的レオロジー定数について考察する。水セメント比30%と45%を比較して動的弾性率 G' は水セメント比が大きくなると、曲線の勾配が緩くなり G' は低下する。これは当然のことであるがペーストが軟かくなることを意味している。動的損失 G'' は練り混ぜ直後には、ほとんど差はなかったが、30分経過すると水セメント比の大きい方が勾配は緩くなっており、従って水セメント比の小さい方がより粘性的性質を示すことがわかる。

Cussens, Harris¹²⁾ らが述べたように、レオロジー定数の経時変化は構造破壊により減少する成分と水和反応により増加する成分の合成として表われるが、構造破壊が起り得る振幅以下に押さえれば水和反応により増加する分だけになると考えられる。しかし、これら以外に振動エネルギーによる締固め効果や不動水の解放による平均液膜厚さが薄くなることによる粘性の上昇、更に振動によってドルマント期においてもセメント粒子の水との接触を促進するなどの効果により、レオペキシー的になる可能性も考えられる。図 3.15 から図 3.18 において水セメント比30%のように自由水の少ないペーストでは、60分程度では動的弾性率 G' の変化はほとんどないが、動的損失 G'' は徐々に減少して粘性が小となるためペーストがより弾性的になって行くのが分かる。これに対して水セメント比45%のペーストは動的弾性率 G' は時間の経過と共に増加して90分

ほぼ30%のペーストに追いつくことが分かる。動的損失 G'' ($=\omega \eta'$) は上昇曲線と下降曲線が違っており、下降曲線が上昇曲線の上にくることを示している。これは明らかに振動によって粘性が増したことになる、ペーストがレオペチックな性質を示したことを意味するものである。しかし、これも時間の経過に伴って減少して行き、90分でほぼ弾性的性質を呈すようになる。これは従来ペーストのせん断挙動の問題としてチキソトロピー挙動が問題とされ研究されて来たが、振動エネルギーが与えられる場合には振動締固め効果や場合によっては水和の促進も考えられ、レオベキシー挙動については今後解明すべき問題である。

モルタルについての結果を図3.19から図3.22に示す。図は水セメント比を一定として骨材

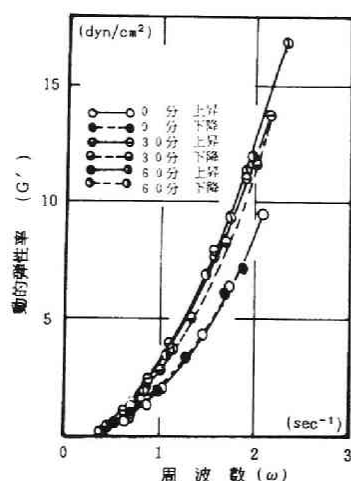


図3.19 モルタルの動的弾性率 G' の周波数及び経過時間の影響 ($W/C=45\%$)

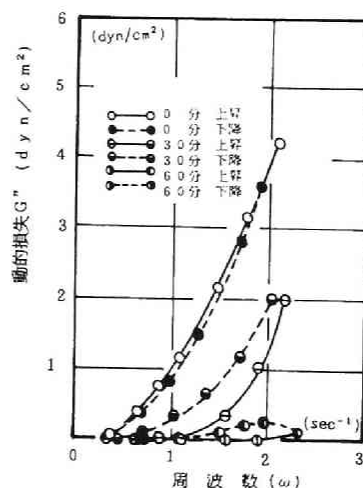


図3.20 モルタルの動的損失 G'' の周波数及び経過時間の影響 ($W/C=45\%$, $S/C=0.5$)

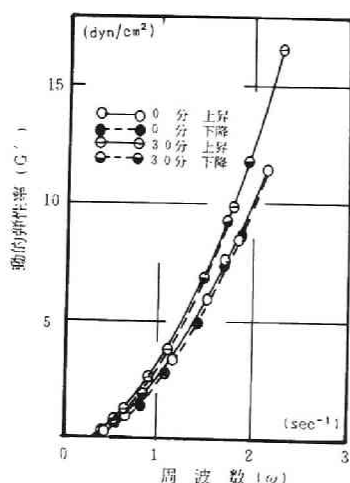


図3.21 モルタルの動的弾性率 G' の周波数及び経過時間の影響 ($W/C=45\%$, $S/C=2.5$)

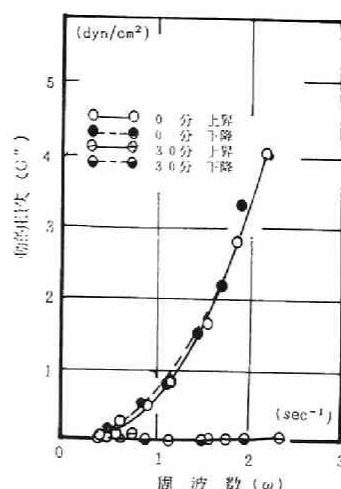


図3.22 モルタルの動的損失 G'' の周波数及び経過時間の影響 ($W/C=45\%$, $S/C=2.5$)

量を変化させた場合である。動的弾性率 G' はペーストの濃度が一定であれば骨材量の影響は少なく、様な経時的増加を示す。しかし動的損失 G'' は時間経過に著しく影響を受ける。セメント骨材比1:2.5のモルタルは30分でほぼ0となり、ペーストが90分かかるのに対して相当早いと言える。これはセメント骨材比1:0.5のモルタルと比較することにより推察されるのであるが、ペースト分が多くなればモルタルの性質もペーストに近づく訳で、1:2.5のモルタル中のペーストの占める容積は少なく骨材粒子の接触点はペースト中の水分の移動、沈降などにより増加し弾性的性質を早く示すようになる。以上モルタルについてもペーストと同様に周波数依存性を有し $\omega=0.2\text{sec}^{-1}$ 付近において動的レオロジー定数は非常に小さな値となり流動域になるほど、無定形高分子の低周波数領域に類似するなどが判明した。

(4) 動的レオロジー定数の経時変化

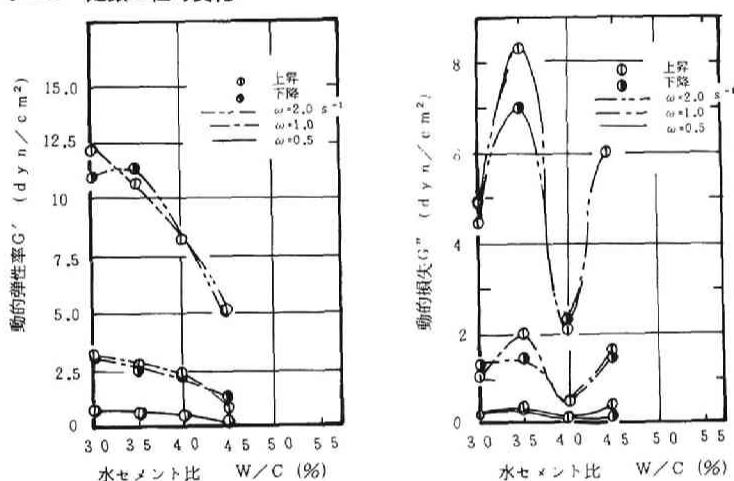


図3.23 ペーストの動的弾性率 G' とペーストの動的損失 G'' と水セメント比及び周波数 ω (sec⁻¹)の関係(練混ぜ直後)

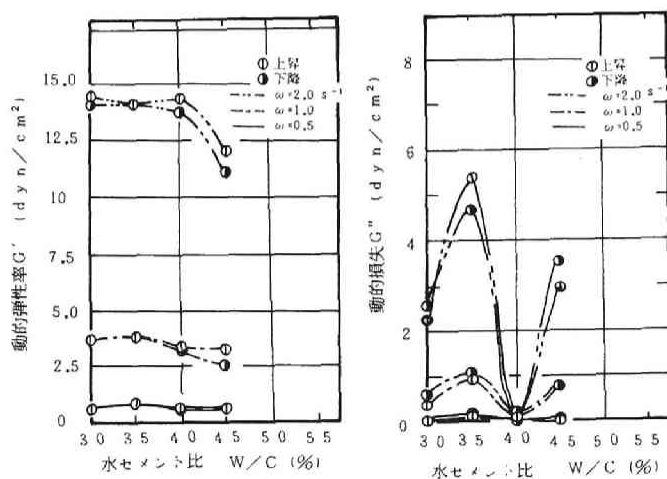


図3.24 ペーストの動的弾性率 G' とペーストの動的損失 G'' と水セメント比及び周波数 ω (sec⁻¹)の関係(30分経過)

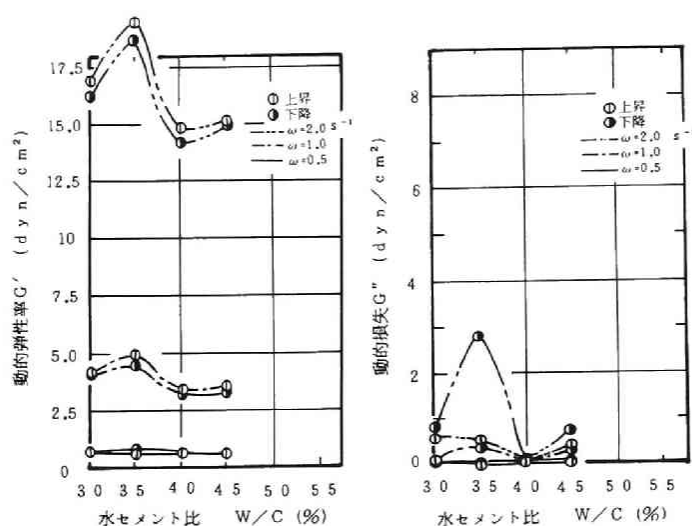


図 3.25 ベーストの動的弾性率 G' とベーストの動的損失 G'' と水セメント比及び周波数 ω (sec^{-1})の関係 (60分経過)

(1) (3)で、すでに説明したようにペーストの粘弾性挙動が材齢が進むに従って弾性成分が粘性成分に対して卓越してくる。これはレオロジー定数の経時変化によって明らかにすることができる。

図 3.23～図 3.25はペーストの水セメント比を変化させた場合の練り混ぜ直後、30分、60分、90分の材齢について実験を行った結果である。(3)において述べたようにペーストは周波数依存性があるため、3種類の振動数についての結果を載せているが振動数が大きい程現象を顕著に表わしているので $\omega = 2 \text{ sec}^{-1}$ ($\gamma = 0.0566 \text{ rad}$)について考察する。

また図中には上昇曲線と下降曲線とでは構造破壊又は生成によって数値が変ってくるので両方載せてある。練り混ぜ直後の動的弾性率 G' はセメント粒子濃度が希薄になるにつれて低下しており、ペースト構造の硬さが水セメント比が大きくなるにつれて低下することを表わしている。また動的損失 G'' ($= \omega \eta'$)は各振動数における粘性を表わす指標となるが、水セメント比35%で最大値を示しているのは、この付近では capillary 域から fanicular 域に近ずき(両域の境界は塑性限界)、流動学的取扱いは塑弾性から弾性的取扱いをされる領域となることを考えると粘性成分が消失し、弾性成分が強調される傾向となる(表 3.1 参照)⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾。次に水セメント

表 3.1 粒子の充てんと水分の関係

水分 (%) 0					
固体	粒子	連続	連続	連続	不連続
液体	水	不連続	連続	連続	連続
気体	空気	連続	連続	不連続	0
充てん形式	pendular 域	funicular 域		capillary 域	slurry 域
臨界点	C-1		C-2	C-3	C-4
Atterberg の命名	(バサバサ)		可塑限界		液性限界
一般粉体を対象とする呼称	混合物 (mixture)		可塑物 (plastic-matter)		泥しよう (slurry)
流動学的挙動	弾性的		弾性的		粘弾性的

比40%において動的損失 G'' が最低値となっている。これは、セメントペーストに関するLapasin¹⁷⁾¹⁸⁾¹⁹⁾の研究によると、比表面積 $3000 \sim 3500 \text{ cm}^2/\text{g}$ 程度の一般的なセメントであれば最も少ないエネルギーでワーカブルなペーストが得られる水セメント比が40%であると報告していることから推察して、この配合が振動締固めに適した配合条件であると考えられる。

次に時間の経過とともにペーストの動的弾性率 G' は増加して行くが、ペーストの濃度によって増加過程が違っている。動的損失 G'' は時間の経過に従って低下して行き、ペーストがより弾性的になって行くのがわかる。

図3.26～図3.28は、セメント比45%のモルタル実験の結果である。実験はペースト同様の

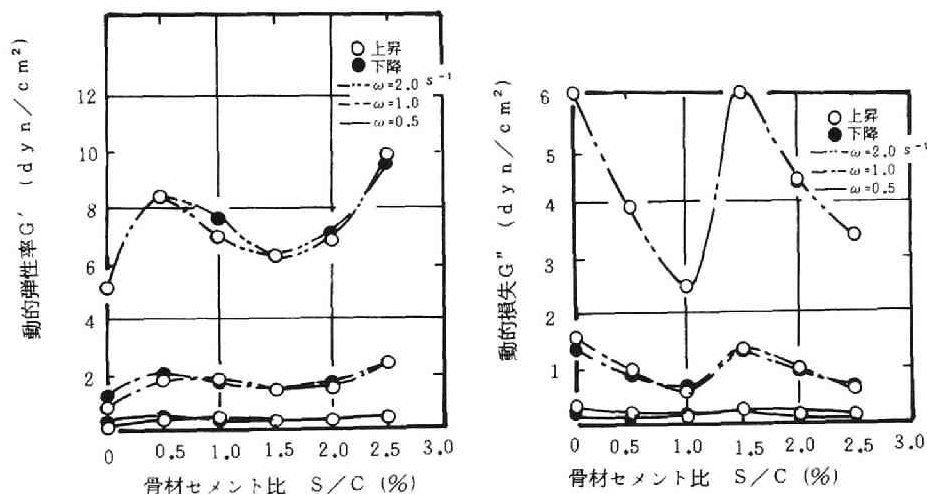


図3.26 モルタルの動的弾性率 G' とモルタルの動的損失 G'' と骨材セメント比及び周波数 ω (sec⁻¹)の関係 ($W/C=45\%$) (練混ぜ直後)

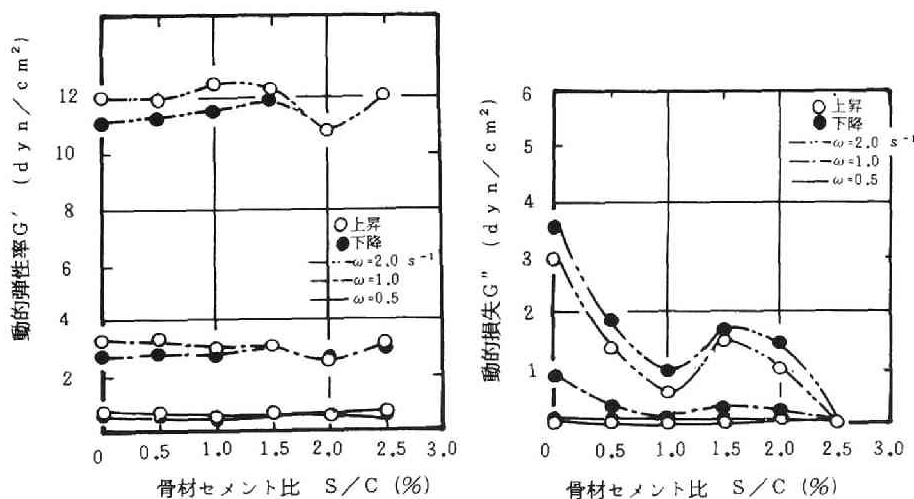


図3.27 モルタルの動的弾性率 G' とモルタルの動的損失 G'' と骨材セメント比及び周波数 ω (sec⁻¹)の関係 ($W/C=45\%$)

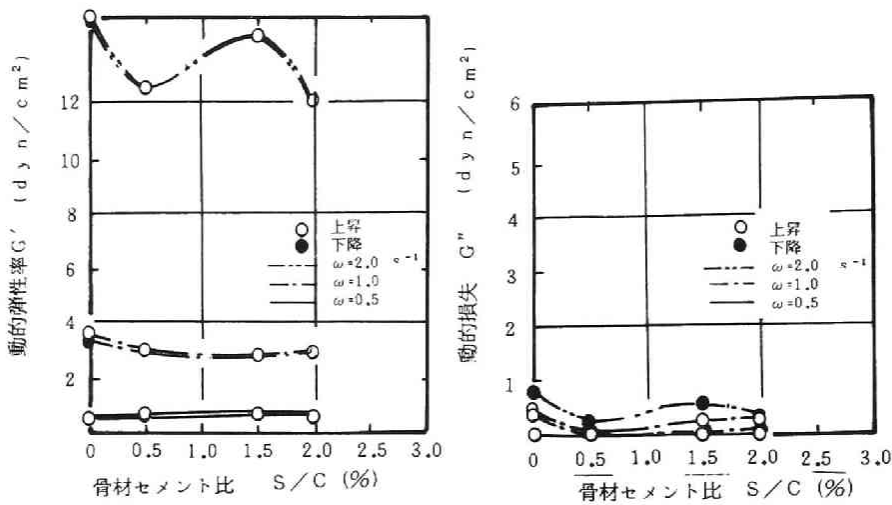


図 3.28 モルタルの動的弾性率 G' とモルタルの動的損失 G'' と骨材セメント比及び周波数 ω (sec^{-1}) の関係 ($W/C=45\%$)

条件とし、骨材セメント比を重量比で 0～2.5 まで 0.5 刻みで変化させたものである。練混ぜ直後において、動的弾性率 G' はペーストに骨材が入ることによってペーストの構造が強化され大きくなっている。しかし骨材量の少ない間は、骨材量の増加によって間隙の減少からペースト分が減少し細粒分が減るので凝集力は低下することになる。従って動的弾性率が低下することになるが、ある程度以上骨材の占める容積が増えると骨材間の摩擦やかみ合せといった粒状体の性質が加わることになり動的弾性率も増加することになる。一方ペースト分の減少によって粘性的性質は減少して行く、また固体分全体の比表面積も低下して行くので粘性は低下してくる。モルタルの場合、砂粒子表面にペーストを付けたみかけの粒子として挙動する^{20)～22)}であろうから、砂量がある程度以上増加すれば（この場合 $S/C=1.0$ 以上）みかけ粒子の濃度の分だけ粘度は上昇する。この時点で一時的に粘度は上昇するが骨材量が更に増加すればペースト分の減少により骨材間の接触点数が増加することになり全体としての粘性は減少して行く。次に時間の経過に伴って水和反応の進行、余剰水の上昇、沈降により動的弾性率は増加していく。この場合この程度の材齢では骨材量と動的弾性率の間には有意差は認められないことがわかる。これに対して動的損失は減少し、一時間で非常に小さな値を示すようになる。この頃からモルタルは弾性的な性質を呈するようになる。粘性率を弾性率で除したものは緩和時間 $\{\tau = \eta' / G' = G'' / (\omega G')\}$ と呼ばれているが、実験タイムスケールの評価として良く使われている。例えば、骨材セメント比 1.5 のモルタルについて図 3.26、図 3.28 に示した値について、練り混ぜ直後と 60 分経過後の角周波数 $\omega = 2.0 \text{ sec}^{-1}$ での緩和時間を計算してみると各々 0.49sec, 0.0076sec になる。 10^{-1} から 10^{-3} のオーダーへと 100 倍の変化をしたことになり、この時間のコンクリートがいかに性質の変化が著しいかが伺える。

²³⁾ Reiner によると水中に固体を分散させた場合の緩和時間は 10^{-4} から 10^{-4} sec の間であると言われている。従って、モルタルがまだサスペンションの範囲にあるものの、小さい方の値に片寄っ

ていることを考えると、相当弾性的性質を有しているといえる。

3.2.5 ま と め

振動式回転粘度計を用いてペーストおよびモルタルに微小振幅の繰返し振動を与えることによって得られた結果をまとめると次の結論を得た。

(1) ペースト、およびモルタルのリサージュ図形（ヒステリシスループ）は前節で述べた降伏値以下の振幅で構造破壊することなしに振動させれば楕円形となり線型粘弾性体としての解析が可能である。本研究では振幅が 4° (0.07 rad) 以内であれば構造破壊が起らないという結果が得られたが、 4° 以上になると動的弾性率や動的損失の値は低下し、流動性を増すため振動締固めを行う場合の振幅はこれ以上にとる方が効果的である。ただし、弾性成分がある程度ないと振動エネルギーの伝播距離が狭められるので余り大きく取り過ぎることのないように本方法などで適当な振幅を定める必要がある。

(2) フレッシュペーストやモルタルのリサージュは材齢が進むにつれて楕円形の勾配は急になると共に楕円の面積は小さくなり粘弾性形から弾性形へと変化する。この場合の緩和時間は一時間で 10^{-1} 秒のオーダーから 10^{-3} 秒のオーダーへと2桁も減少する。

(3) フレッシュペーストやモルタルの動的レオロジー定数は振幅が大きくなると小さくなる。その傾向は水セメント比が小さい程大きい。従って水セメント比の小さいもの程振動締固めに対する効果は大きく、更に振動機の振幅は大きく取った方がより効果的である。

(4) フレッシュペーストやモルタルの動的レオロジー定数は周波数依存性を有し、低周波数領域では無定形高分子の周波数特性に類似する。また微小振幅での振動が与えられる場合、周波数の上昇と下降によって得られる動的レオロジー定数と周波数の関係はヒステリシス曲線となりレオベキシー現象を示す配合がある。

3 3 振動台による振動下の挙動

3 3 1 は じ め に

硬化したコンクリート供試体に振動を与え、その1次固有振動数を測定し、動弾性係数や対数減衰率等を求めることにより、コンクリートの経年変化や劣化の性状を知ることが目的とする方法として、共振方法（ソニック法）がある。この方法はASTMC251, BS1881, JISA1127に規定されており凍結融解試験などにおいて広く利用されている。この方法で対数減衰率を求める場合には、コンクリートを粘弾体として取扱っている。フレッシュコンクリートは粘性が大きく弾性の小さい粘弾性体と考えられ、経時的に弾性が増加して硬化して行く。

この節では、このソニック法をフレッシュコンクリートに適用し、固有振動数を共振曲線から求める方法により、その動的弾性率および動的粘性率と配合の関係について実験的に考察した。

3.3.2 共振法によるフレッシュコンクリートの振動

供試体に周期的な応力または歪を加えた際の応答からレオロジー定数を求める方法として前節

ではヒステリシスループ法によった。ヒステリシスループ法で問題となったようにコンクリートのような水-固体粒子系の懸濁液の場合、栓流やすべりの発生という現象を解決しながら測定する必要があり、操作が複雑である。本節では、供試体に縦振動を与え、各振動数における振幅を測定し、共振曲線からレオロジー定数を求める共振法を用いている。共振法の特徴は、駆動を電磁型や静電型の駆動子で微小振動を与えるだけでよく、この点すべりの問題はある程度解消できる。今、コンクリートを1自由度振動系(粘性減衰)と近似的に仮定するとこの系に角振動数 ω なる余弦的变化する外力 $F \cos \omega t$ が加わったとするとこの時の運動方程式は次のように置くことができる。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F \cos \omega t \quad (3 \cdot 10)$$

ここで m は質量、 x はマスの平衡位置からの変位、 c は粘性定数、 k はバネ定数である。(3・10)式の定常解は

$$x = A \cos(\omega t - \phi) \quad (3 \cdot 11)$$

$$\tan \phi = \frac{c \omega}{k - m\omega^2} \quad (3 \cdot 12)$$

$$A = \frac{F}{\sqrt{(k - m\omega^2)^2 + c^2 \omega^2}} \quad (3 \cdot 13)$$

ここで ϕ は位相角、 A は定常状態における振幅である。振幅と角振動数の関係を図で表わすと、図3.29のようになり、粘性抵抗が小さくなるにつれて、共振は鋭くなる。

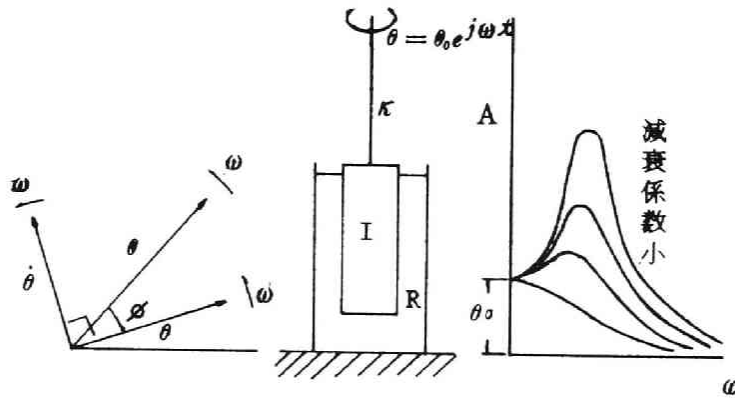


図3.29 減衰のある強制振動

供試体に振動を加え振動振幅を観測し図3.30のような振幅共振曲線が得られたとする。共振振幅 A_{\max} の $1/\sqrt{2}$ に対応する振動数を f_1, f_2 とすると、band width Δf は $\Delta f = f_2 - f_1$ である。共振振動数 f_r 、供試体の高さを l 、密度を ρ とすると動的弾性率 E' 、動的粘性率 η' は次式により求められる。

$$E' \cong \rho(4lf_r)^2 \quad (3 \cdot 14)$$

$$\eta' \cong \frac{E' \Delta f}{\omega f_r} = \frac{E' \Delta f}{2\pi f_r^2} \quad (3 \cdot 15)$$

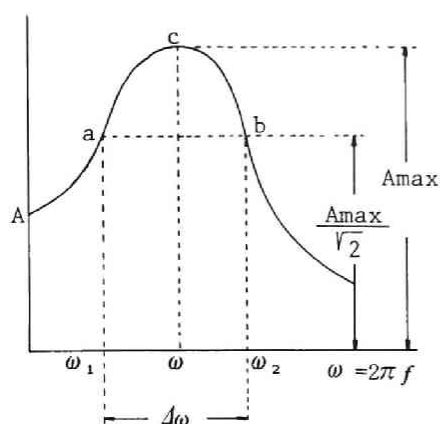


図 3.30 振幅共振曲線

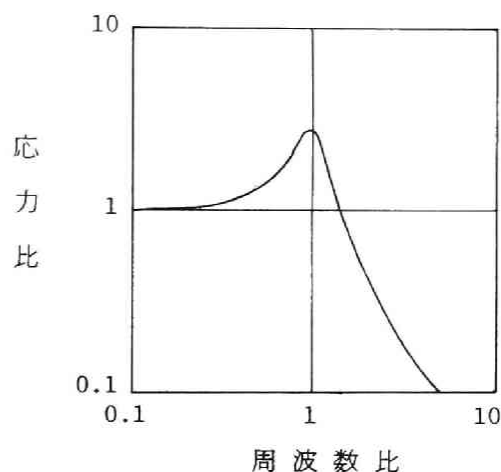


図 3.31 スラブコンクリートの共振曲線 (Bache による)²⁾

コンクリートの共振を扱った研究は少ないが Harris²⁴⁾ らや Bache²⁵⁾ の報告がある。図 3.31 はスラブ状コンクリートの表面を振動させた場合の共振曲線²⁶⁾ であるが、図 3.29 と一致した形状を示しており、コンクリートの振動が上述の 1 自由度系として取扱える可能性を示したもので本研究においても動的レオロジー定数を (3・14) (3・15) で求めることとした。

3 3 3 実験方法

表 3.2 使用材料の性質および配合

a) セメントの物理試験結果

比重	粉末度		凝結試験			安定性	フロー値 (mm)
	ブレン値 (cm ² /g)	88μ残分 (%)	標準軟度 (%)	始発 (時一分)	終結 (時一分)		
3.15	3130	3.4	28.8	2-41	3-45	良	242

b) 骨材の物理試験結果

	比重	吸水率 (%)	粗粒率	単位容積重量 (kg/m ³)	空隙率 (%)
細骨材	2.64	2.0	2.81	1730	34.7
粗骨材	2.65	1.0	6.83	1670	37.2

c) コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	空気量 (%)	W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m ³)			
				W	C	S	G
10	1.0	45	50	181	400	900	900
10	1.0	55	50	196	356	900	900

実験に用いたセメントは普通ポルトランドセメント（日本社），骨材は表 3.2 に示す愛知川産天然骨材を使用した。コンクリートの配合は水セメント比を45%，55%の2種類とし細骨材率を一定とした。

実験装置は，発振器（0～10KHz），電力増幅器，加振器，周波数カウンターからなる加振部とピックアップ，デュアルビームシンクロスコープからなる受振部によって構成される（図 3.32）。型枠は外壁からの影響をなくするために，直径10cm，高さ20cm，厚さ1mmの塩化ビニール管を用い，更に供試体と外壁の摩擦を消すために外壁に銅粉を塗り，パラフィン紙を二重に貼り合せたもので供試体を包んだ。ピックアップには小型軽量化を目的として，円筒形のチタン酸バリウム磁器を使用し，直径1cm，高さ2cm，厚さ0.1mmの銅製円筒形のピックアップを作成した

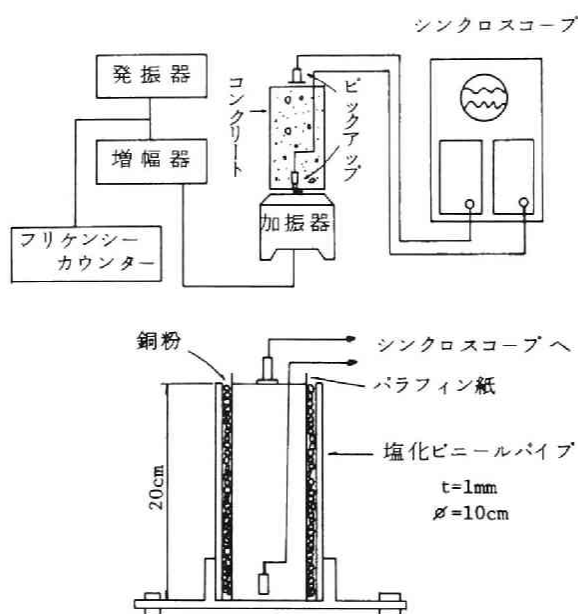


図 3.32 実験装置図および型枠詳細図

（図 3.32）。骨材は表乾状態のものを使用し，コンクリートはすべて手練りとした。供試体は1分間空練り後注水し3分間練り混ぜたものを棒で十分突きながら型枠に詰め，15秒間95Hzで振動締固めを行ったものを測定開始時間とした。またこの時，共振点での位相のずれを測定するためにピックアップを型枠の底と上面に設置した。

3.3 4 実験結果および考察

（1）共振曲線

コンクリートの共振曲線を明確に示した研究は少ないがコンクリートの振動締固めに関する研究は多く，振動機の最適振動数が共振点付近にあることは想像される。一般に，内部振動機で6000 v.p.m から12000 v.p.m（100～200Hz）²⁷⁾表面振動機で3500 v.p.m（58Hz）付近であるこ

とを考慮すると 50～200Hzの範囲内にあるものと思われる。図3.33は水セメント比55%のコンクリートについて 50Hz～200Hz まで10Hz 毎に測定した受振振幅である。90Hz 付近と160Hz 付近にピーク値のあることを示しており第1のピーク値である90Hz 付近に1次固有振動数があることがわかった。図3.34は水セメント比45%、55%のコンクリートの共振曲線である。

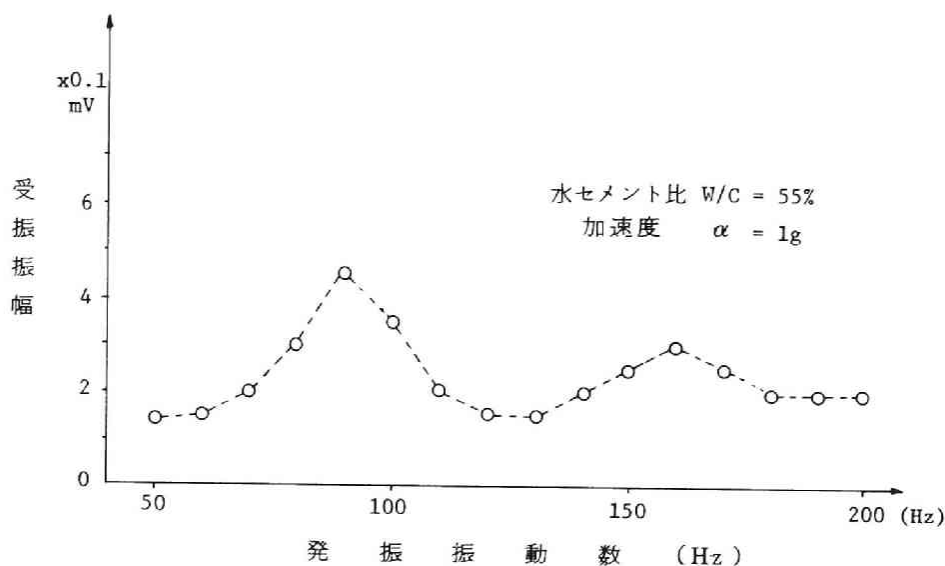


図3.33 コンクリートの発振振動数と受振振幅

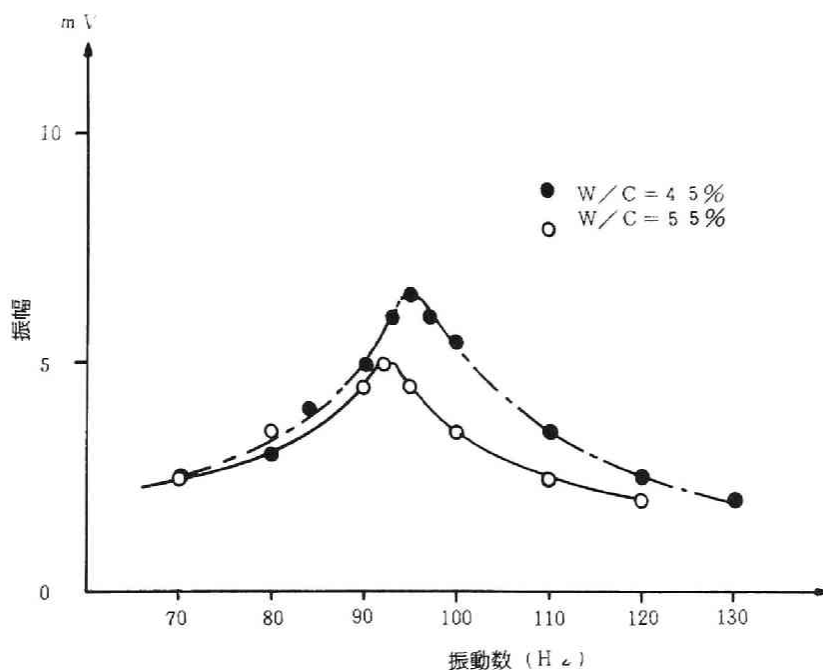


図3.34 水セメント比の違うコンクリートの共振曲線

フレッシュコンクリートの減衰係数は非常に大きく、したがって縦振動による縦波の伝播は減衰して受振振幅もかなり小さい。また共振曲線の band width Δf も 20~30Hz 程度になっている。共振点における波形は写真 3.2 のように上下ピックアップの受振波形の位相遅れが 90° になっている。これは、一端固定の基本共振を明確に表わしている。

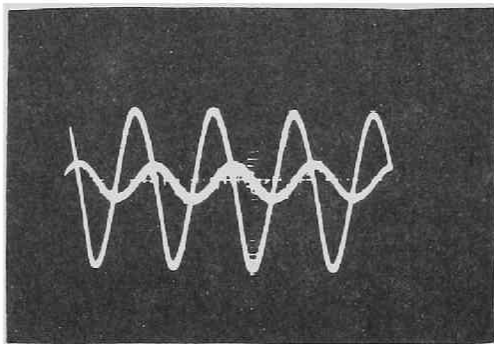


写真 3.2 共振点における受振波形 (W/C=45%)

(2) 共振点と加速度

コンクリートの振動締固めの効果は振動時間、加速度、ワーカビリティの 3 つの条件の組み合わせにより最適な振動条件が決まると言われている。本研究の装置では縦型振動であるからテーブル振動機が参考になると思われる。テーブル振動機は加速度として 4~12g が有効であるとされている。従って本研究ではコンクリートを構造破壊させずに粘弾性体としての振動を考えているので加速度は 4g 以下が適当である。図 3.35、図 3.36 はコンクリートの共振曲線と加速度の

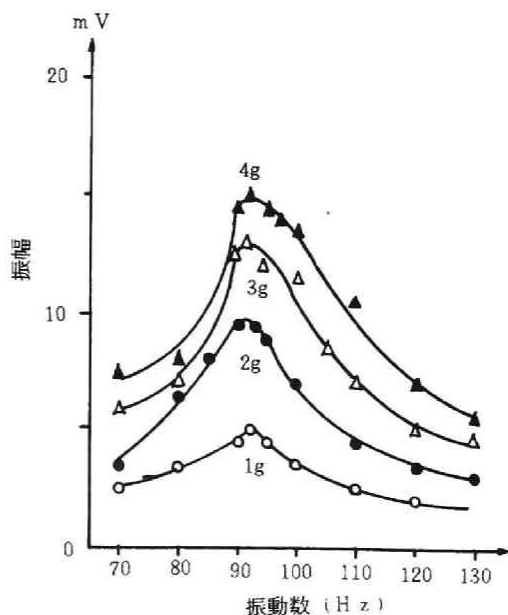
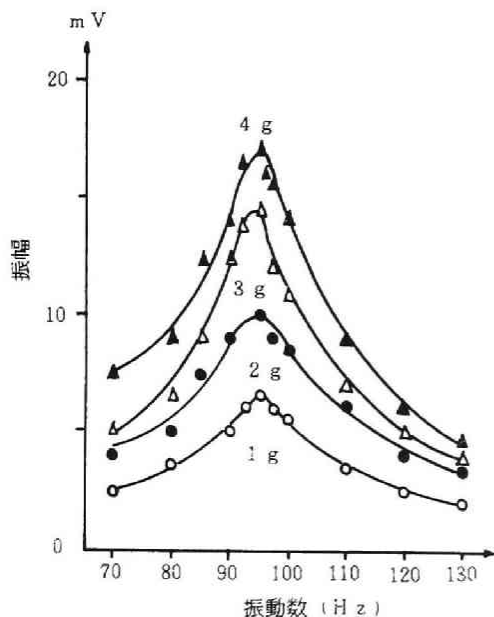


図 3.35 コンクリートの共振曲線 (W/C=45%)

図 3.36 コンクリートの共振曲線 (W/C=55%)

関係を示したものである。共振振動数は骨材量が一定であれば水セメント比の小さい方が幾分高い振動数となったが、これはみかけ密度が増加することで共振点が下ることよりも動的弾性率の増加によって共振点が高くなる方が上まわったためであろう。また加速度の増加により共振曲線は鋭くなり、粘性が低下する傾向を見せている。加速度の増加によって共振点が変わることがあれば材料分離もしくは物質の変化が考えられるが4g以下の実験では共振点に変化はなかった。図3.37は1時間毎に3時間まで測定した共振曲線の変化を示す1例である。水和や沈降により物質が変化すれば共振点が変わるということを示したものである。

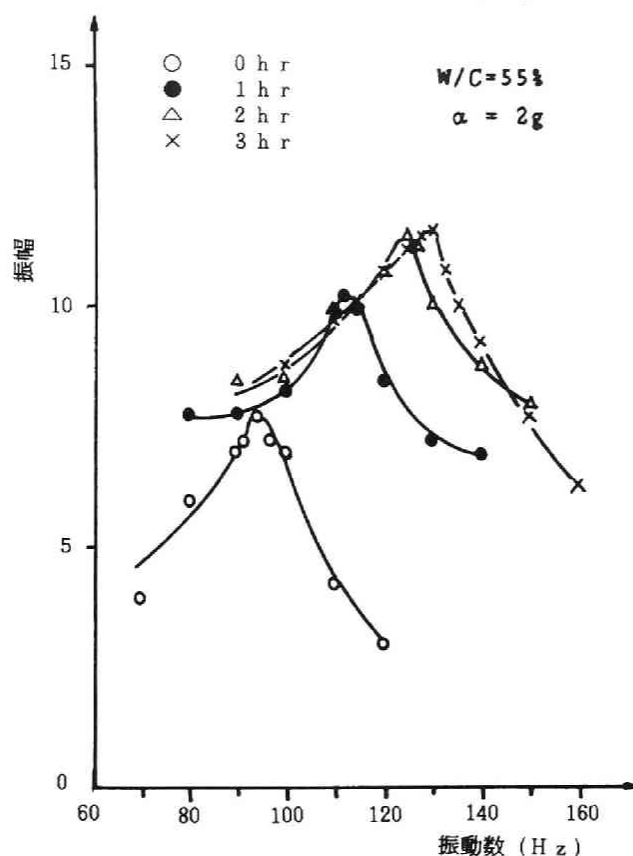


図3.37 共振曲線の経時変化

(3) 配合と動的レオロジー定数との関係

振動伝播に及ぼすコンクリート配合の影響として、粗細骨材比の大きい方が振動の伝播性は良好であり細骨材率やモルタル量も減少させられる。²⁹⁾ ACIは振動締固めコンクリートの配合について可能な限り最小のスランプ、最少の細骨材率、最少の粗骨材の最大寸法の選択を推奨している。³⁰⁾ このように骨材の影響が大きいことが一般的に言われている。本研究では骨材の条件を一定としてペーストの濃度を变化させた場合の共振法による動的レオロジー定数にどの様に影響するのかを調べてみた。図3.38は(3・14)(3・15)式によって求められたコンクリートの動的弾性率および動的粘性率である。図において動的レオロジー定数は骨材の条件(細骨材率50%,

粗骨材の最大寸法10mm)を一定としていても水セメント比にも影響されることを示している。

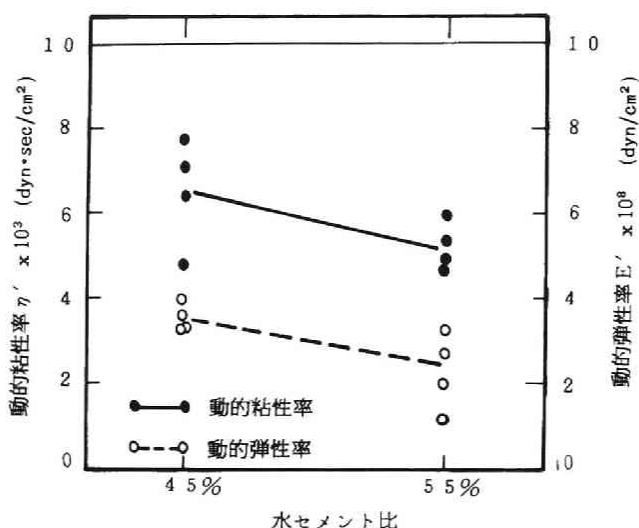


図3.38 コンクリートの動的弾性率と動的粘性率（水セメント比の影響）

振動締固めにおいて、コンクリートの共振点付近で振動を与えてやることは非常に効果的である。コンクリートの共振点は限られた実験範囲ではあるが、水セメント比の違いによって多少の違いがあっても100Hz 前後に存在しており現在使用されている振動機の振動数に近いことを示している。また振動機の振動数が可変なものであれば、水セメント比の大きな配合には100Hz より低い振動数を水セメント比の小さい配合には100Hz より高い振動数を与える方がより効果的であり、また再振動を加える場合には図3.37から材齢に応じた高い振動数を用いる方が効果的であるといえる。

3.3.5 ま と め

フレッシュコンクリートに共振法を適用することによって共振曲線を描きレオロジー定数を求めた。本節で得られた結果をまとめると以下になる。

- 1) フレッシュコンクリートの振幅共振曲線は1自由度振動系の共振曲線に類似しており共振点はコンクリートの配合によって多少違うが1次共振点は本実験条件では100Hz 前後に存在する。
- 2) フレッシュコンクリートの共振曲線は加速度の増加によって鋭くなり、4g以下の加速度においては共振振動数はほとんど変化しない。即ち4g以下においても粘性は加速度を増加させることで低下する。
- 3) フレッシュコンクリートの共振曲線から得られる動的レオロジー定数は骨材の性質および配合条件を一定とした場合、水セメント比を大きくすることで低くなる。

また共振点は3時間程度の間に1時間毎15~20Hz程度の割合で増加して行く。従って振動締固めを行う場合には、締固めを行う注水時間からの経過時間に応じた共振振動数で振動させるのが有効であると考えられる。

3.4 球引上げ型粘度計の適用

3.4.1 はじめに

振動により液状化し流動状態にあるコンクリートの性質を知ることはコンクリートを材料分離などの欠陥となる要因なしに締固めたり、型枠の隅々まで行き渡らせるために流動させる条件を決定する上で重要である。本節では近年普及して来た流動化コンクリートの振動時における挙動を球引上げ型粘度計を用いて測定する試みを行った。流動化コンクリートは硬練りコンクリートに高分散性の減水剤を添加、攪拌し一時的に流動性を高めることでコンクリート工事の施工性を向上させたものである。我国においては、建築の分野においてポンプ施工の普及による施工性の追求のあまり単位セメント量、単位水量、砂量を増加させたことからひび割れの多発を誘発することとなり、この問題を解消する目的から広く利用されている。また近年土木の分野においても元来硬練りである土木用コンクリートの施工性を向上し、省力化を図ろうとする目的から急速に普及しつつある。コンクリートを流動化させる目的で添加させる分散剤は流動化剤と呼ばれており、代表的なものにはナフタリンスルホン酸ホルムアルデヒド高縮合物（以下ナフタリン系と呼ぶ）、メラミン樹脂スルホン酸ホルマリン高縮合物（以下メラミン系と呼ぶ）がある。流動化剤は従来から用いられているリグニン系の減水剤が8～15%の減水率であるのに対して15～30%の減水率を有しており高性能減水剤、スーパープラスチサイザーとも呼ばれている。減水剤として用いられているリグニン系で約50年の歴史を有しており、その性能、特性については十分な実績が蓄積されている。これに対して流動化剤は服部らによって1962年に開発されたナフタリン系や1968年に Aignesberger によって西ドイツで開発されたメラミン系は15～20年程度しかたっており、また我国においては高強度コンクリート用減水剤として西ドイツにおいては硬練りコンクリートの流動化剤として発達してきたことを考えると、流動化コンクリートに用いた場合の流動化コンクリート特有の性質についての基礎的な研究が不足しているものと思われる。流動化コンクリートは省資源、省エネルギーの立場から考えて、施工性の向上による省力化、産業副産物の利用など世界的に注目されるようになり、スーパープラスチサイザーの国際シンポジウムがカナダのオタワにおいて1978年、1981年と2回開催され多くの研究が発表されている。

規格については西ドイツにおいて1975年にDIN特別規程としてDIN1045, 1048に対して「流動コンクリートの製造および施工に関する指針」が作成され、英国においては規格指針は制定されていないがCCAが流動化コンクリートに関する報告書をまとめている。我国では昭和53年、55年に日本建築学会より「流動化剤の性能基準案」が出され、昭和58年に土木学会から「流動化コンクリート施工指針（案）」が出されている。米国ではナフタリン系およびメラミン系の高性能減水剤について標準型、遅延型の規格がASTMに制定されている。このように国際的に規格化が進む中で流動化コンクリートのコンシステンシーをどのように判定するのか、流動化コンクリートの製造方法、コンクリートの性質の著るしい経時変化（スランプロス）など規格化の難しい問題が多く含まれており解明されるべき基礎的な研究の必要性を残している。本研究は土木用の硬練りコンクリートを流動化した場合のコンシステンシーを物理量としてどのように測定するかという問題において、特に施工時に振動を受けている流動化コンクリートの性質を物理量

によって表現することを目的とした。流動化コンクリートに振動を与えることは配合によっては著しい材料分離を引き起こすことになるが、一般の土木用コンクリートに適量の流動化剤を添加することは極度の振動を与えないかぎり流動性を向上する。本章では材料分離が起らない範囲内での振動中の流動化コンクリートについてレオロジー的な実験を行っており、ここでは著しい材料分離については取り扱っていない。レオロジー的な観点から振動時のコンクリートの研究を扱ったものは少ない^{32)~39)}。レオメーターとしてはコンクリート容器を振動台上に置いて所定の条件でコンクリートを振動させ金属球を引き上げるもの^{32)~36)}、6枚ペーンを回転させるもの³⁷⁾、2点ワカビリチー装置MKⅡを回転させるもの³⁸⁾や容器内に振動源を置き振動源から数点の位置においてペーンを回転させる³⁹⁾などの装置が用いられている。

本研究では、振動状態にある流動化コンクリートを連続的にペーン等の回転体で攪拌することは品質の変化を促進することになるため、これを避け、また1回の測定により流動曲線が得られる特徴を有する球上げ粘度計を採用した。

3.4.2 球引上げ型粘度計の理論

球引上げ型粘度計は落球粘度計を応用したもので L'Hermite, Tournon³²⁾によって振動中のコンクリートの粘度を測定する目的で開発された。落球粘度計とはニュートン液体中を落下する剛体球が落下力と粘性力が動的平衡状態となった時、落下速度は定常状態(終末速度 v_0)となるがこの速度を求める方法である。 v_0 を測定すれば粘性力(粘性抵抗) F は Stokes の法則より、球の半径 r とすると

$$F = 6\pi\eta v_0 r \quad (3 \cdot 16)$$

落下力(重力) f は、球の密度 D 、液体の密度 ρ 、重力の加速度 g とすると

$$f = \frac{4}{3} \pi r^3 (D - \rho) g \quad (3 \cdot 17)$$

となり(3・16)と(3・17)を等しいと置いて、粘性係数 η は

$$6\pi\eta v_0 r = \frac{4}{3} \pi r^3 (D - \rho) g \quad (3 \cdot 18)$$

$$\eta = \frac{2gr^2(D - \rho)}{9v_0} \quad (3 \cdot 19)$$

となる。ただし、Stokes の法則が適用できるのは慣性を無視できる遅い流れにのみであるからレイノルズ数は1以下の場合である。(3・16)式の代りにオーセンの式

$$F = 6\pi\eta r v_0 \left(1 + \frac{3}{8} \cdot \frac{rv_0\rho}{\eta}\right) \quad (3 \cdot 16)'$$

を用いると、レイノルズ数は10以下であれば適用することが出来る。なおレイノルズ数 $[Re]$ は落球粘度計の場合次式により求める。

$$[Re] = \frac{[\text{球の直径または半径}] [\text{相対速度}] [\text{密度}]}{[\text{粘 度}]} \quad (3 \cdot 20)$$

球引上げ型にすると特徴として球の速度を自由にコントロール出来るということと、球の抵抗

が少々大きくても、球を動かすことができるということである。

L'Hermite³²⁾らは振動を受けたコンクリートはすぐにニュートン流体となるとして(3・16)によって粘度を求めている。同様に Rebut³⁴⁾ 明石³⁵⁾もニュートン流体となるとして Stokes¹⁹⁾式により解析しているが Tattersall³⁾, Powers³³⁾, Desov³⁸⁾, Dimond⁴¹⁾が指摘している様にペースト、モルタル、コンクリートが非ニュートン流体として挙動する。図3.39は Tattersall⁴¹⁾によって求められた流動曲線であるが振動により降伏値が0の方向へ移動することやビンガムの直線部分が曲線となるチクソトロピック流動を示すことで各研究者の意見が一致している。従って、ある一定の速度で球を引き抜くことは、ある一点のせん断速度におけるみかけ粘度を測っていることになり粘度は無限に存在することになる。本研究では近似的に流動化コンクリートがビンガム流体であると仮定し、流動曲線から直線部分を求め、勾配より塑性粘度 η_{pl} 、せん断応力軸との切片を降伏値 τ_y として求めることとする。

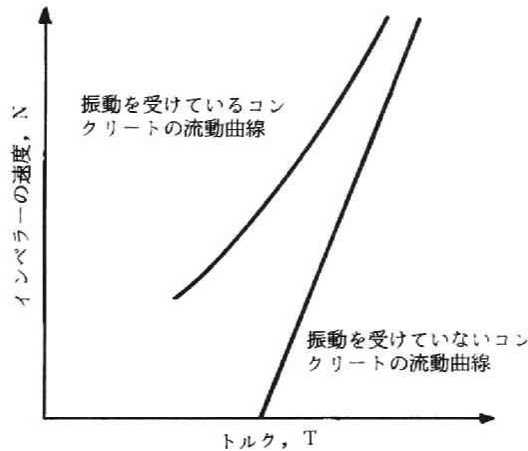


図3.39 コンクリートの流動曲線への振動の影響 (Tattersallによる)⁴¹⁾

ビンガム流動はせん断応力 τ 、速度勾配 D とすると次式で表わせる。

$$\left. \begin{array}{ll} \tau \leq \tau_y & D = 0 \\ \tau > \tau_y & \tau = \eta_{pl} D + \tau_y \end{array} \right\} \quad (3 \cdot 21)$$

上式からせん断応力 τ が降伏値 τ_y を越すまでは流動しないということであるから、鋼体球がコンクリート中を移動する場合、静止域と流動域ができる。この静止域と流動域の境界をどのように分けるかということがビンガム流動問題の難しさとされてきた。無限拡がりのビンガム流体⁴²⁾の様な慣性力を無視できるほど遅い流れの中に固定された球については吉岡⁴³⁾ら、Ansley⁴⁴⁾ら du Plessis⁴⁶⁾ Ito⁴⁷⁾らによってすでに解かれている。

ここでビンガム数 N_B 、抗力係数 C_D 、レイノルズ数 Re とすると

$$N_B = \frac{2r\tau_y}{\eta_{pl} \cdot v}, \quad C_D = \frac{2F}{\rho v^2 \pi r^2}, \quad Re = \frac{2rv\rho}{\eta_{pl}} \quad (3 \cdot 22)$$

また無次元数 X は次のように定義する。

$$X = \frac{C_D R_e}{24} \quad (3 \cdot 23)$$

ビンガム流動が球に与える影響を次のように表わす。

$$X = \alpha N_B + 1 \quad (3 \cdot 24)$$

上式に (3・22) (3・23) を代入すると

$$\frac{F}{12\pi r^2} = \frac{v}{2r} \cdot \eta_{pl} + \alpha \tau_y \quad (3 \cdot 25)$$

この式が解析式となるが上式において α をどのように定めるかである。⁴⁷⁾岸谷らも指摘しているように Ansley らの $\alpha = 7\pi/24$ という値は粘土スラリーについてのビンガム数と α の関係についてまとめたものであり、二次元すべり線解析を球のまわりの流れに適用したものである。これは、実験において球が試料から抜け出る様子を観測した結果、球の近傍のみが流動しており、Ansley の α 値はこの点で評価できる。本研究では、流動化コンクリートに適用する α 値を Ansley らの α 値とし、次式により解析した。

$$\left. \begin{aligned} \frac{F}{12\pi r^2} &= \frac{v}{2r} \eta_{pl} + \left(\frac{7\pi}{24} \right) \tau_y \\ \left(\frac{2}{7\pi^2 r^2} \right) F &= \left(\frac{12v}{7\pi r} \right) \eta_{pl} + \tau_y \end{aligned} \right\} \quad (3 \cdot 26)$$

次に球径と型枠寸法の関係についてであるが、一般に落球粘度計では Stokes あるいは Oseen 近似で解析する場合は流動域が無限の広がりを持つとしているので有限の円管では壁の影響が考慮される。現在一般に用いられている補正式に Faxén の式がある。

$$\eta' = \eta \left[1 - 2.104 \left(\frac{d}{D} \right) + 2.09 \left(\frac{d}{D} \right)^3 - 0.95 \left(\frac{d}{D} \right)^5 \right] \quad (3 \cdot 27)$$

ここで η' は補正粘度、 d は球径、 D は円管径である。

ペースト、モルタル、コンクリートのような非ニュートン流体の場合、現在のところ適当な補正式はないので球径と円管径の比率を何種類か代えて影響のないところで測定するより方法はない。ただし、ビンガム流体として Ansley らの式を適用することは球の近傍においてのみ流動域が発生すると考えているので Faxén 式における (d/D) をある程度小さくしておき、補正する必要がない程度の比率にさえしておけば余り重要に考える必要はない。⁴⁹⁾岸谷らの報告でもこの点については確証されている。

3 4 3 実験方法

セメントは普通ポルトランドセメント（日本社）、細骨材は野州川産川砂（比重2.65、吸水率1.6%、FM2.63）、粗骨材は高槻産碎石（比重2.70、吸水率0.7%）を用いた。流動化剤はナフタリン系（F）とメラミン系（N）の2種類を使用した。実験に用いたベースコンクリートの配合は表3・3に示すように、水セメント比を50%と一定にし、目標スランプ3 cmおよび7 cmのAEコンクリートとした。また各ベースコンクリートの流動化後の目標スランプは各々7 cm、15

表 3.3 ベースコンクリートの配合

ベース S L	M.S (mm)	Air (%)	W/C (%)	S/a (%)	単 位 量 (Kg/m ³)					
					W	C	S	G	UFA	AE 助剤
3cm	20	4 ± 1	50	41	167	334	744	1070	3.34	2.68
7cm	20	4 ± 1	50	40	175	350	724	1042	3.49	2.80

cmとした。

試料の練り混ぜは可傾式ミキサー（容量120ℓ、回転数は低速時2.4r.p.m、高速時24r.p.m）によって行い、ベースコンクリートの練り混ぜは1分間空練り、2分間本練りとした。コンクリートの流動化は、スランプロスの回復に必要なと思われる添加量の流動化剤を添加後2分間の高速攪拌により試料を得た。スランプおよびレオロジー量の測定は30分間低速攪拌後およびスランプ回復後に行い、これを1サイクルとして6回程度繰返した。

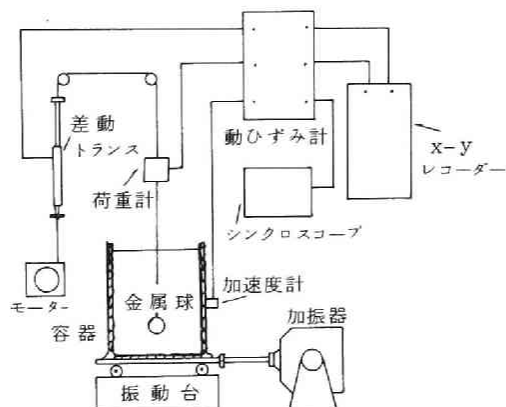


図 3.40 球引上げ型粘度計

レオロジー量の測定は図 3.40に示す球引上げ型粘度計を試作した。測定方法は、練り混ぜた試料を容器（25×25×50cm）に密実に充填した後、流動化コンクリートが振動締固めあるいはコンクリートポンプなどにより周期的に外力を受けることを想定して振動（周波数75Hz、加速度4.5g）を加えた。球は直径3.16cm（ $d/D=0.126$ ）の真鍮製金属球で底から約5cmに配置し、可変モーターによって引上げる。この時の球の変位を差動トランス、抵抗力を荷重計により測定し、変位および荷重の時間変化をX-Yレコーダーに記録させ解析した。また振動時の型枠の振動を加速度計により周波数および加速度を測定しシンクロスコープにより観測した。

球の引上げ速度はレイノルズ数を1.0以下とすること、および粗骨材によるアーチ作用を考慮して、球速を0.05cm/sec から0.7cm/sec の範囲で7段階程度に変化させた。同一試料内で7段階程度に変化させたのは、攪拌履歴によりレオロジー量は変化するという報告^{50) - 53)}から、一つの試料について球によるせん断は一回しか行わないことと、一回の試験により流動曲線を得るという2つの理由からである。

3.4.4 実験結果および考察

(1) 繰返し添加によるスランプの変化

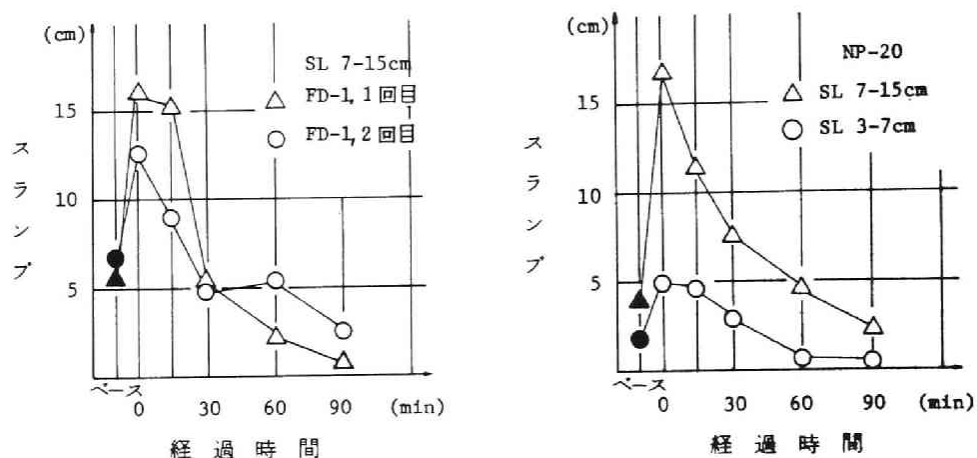


図3.41 流動化後のスランプの変化

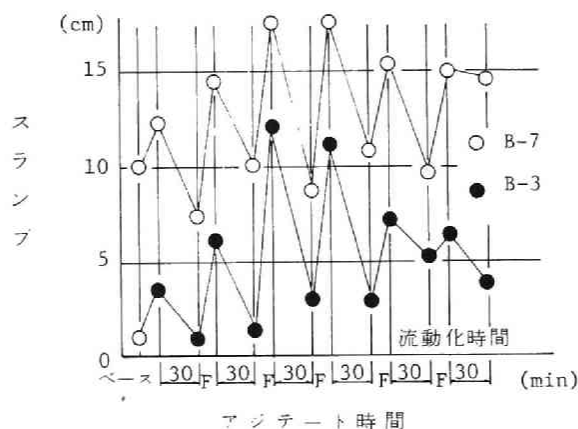


図3.42 繰返し添加によるスランプの変化

ベースコンクリートに流動化剤を添加して流動化した後のスランプは図3.41に示すように経時的に減少して行く。いずれの配合においても流動化後30分間に大きなスランプロス⁵⁴⁾を示し、それ以後の減少割合はかなり低下している。これは服部⁵⁴⁾の説明にあるようにセメントの水和反応速度と直接関係するものである。これに対して30分毎に繰返し添加した場合のスランプ変化の一例を示したのが図3.42である。30分間でロスしたスランプを目標のスランプ15cmおよび7cm回復させるための流動化剤の添加量はメーカー推奨値を用いた。この時の各流動化におけるスランプ1cmを増加させるのに要した回復添加率を表3.4に示す。この流動効果について練り混ぜ時間別に考察してみると、繰返し添加初期(表中記号*0, *30)では、土木用の硬練りコンクリートを目標スランプまで流動化させるにはメーカー推奨値では不足する傾向にあるが、繰返し

表 3.4 回復添加率の経時変化

B - 7 (F)			B - 3 (F)		
アジテート時間		(%)/cm	アジテート時間		(%)/cm
ベース	*0	0.109	ベース	*0	0.168
30	*30	0.066	30	*30	0.106
60	*60	0.041	60	*60	0.053
90	*90	0.043	90	*90	0.042
120	*120	0.047	120	*120	0.058
150	*150	0.051	150	*150	0.109

* 流動化時間

添加が進むにつれて逆に過剰添加の傾向を示した。このことは前述の説明にもあるようにセメントの水和速度と関係している。すなわち繰返し添加初期ではセメント粒子は水和による化学的及びコロイド凝集力による強い結合を示すので、この凝集を解くのに多くの流動化剤を必要とする。一方時間が経過してドルマント期に入るとコロイド凝集力のみとなるため流動化剤が少なくて済むものと思われる。このことは表 3.4 の回復添加率が練り混ぜ時間の経過とともに減少傾向にあり、ドルマント期から加速期に入ると増加の傾向を示すことから推察できる。以上から土木用コンクリートを繰返し添加法により流動化する場合セメントの水和反応速度と回復添加率とが関係するため、一定の添加率では所定の回復スランプが得られにくいということがわかった。

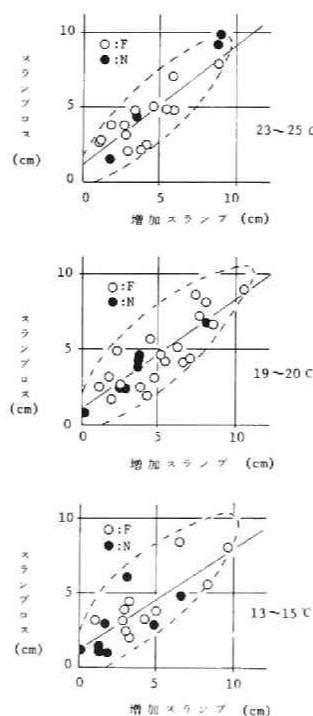


図 3.43 スランプロスと回復スランプの関係
(23~25°C, 19~20°C, 13~15°C)

図3.43は各測定時間において流動化剤の添加によって増加したスランプとその30分後のスランプロス量の関係を練り上り温度23~25℃, 19~20℃, 13~15℃の3つシリーズについて示したものである。測点をプロットする際、配合、練り混ぜ時間を無視している。図より、直線回帰した場合の相関係数は0.8から0.9の間にあり、両者に相関性があることがわかる。このことから、流動化により増加したスランプは30分後には回復量の80%から90%がロスすると考えられる。更に、繰返し添加によって長時間コンクリートのコンシステンシーを維持する場合、各時間に多量に添加しスランプを大きく引き上げても短時間に大きくロスするので、むしろ添加間隔を短くし、小刻みに少量ずつ添加する方が流動化剤の使用量を減じられるものと考えられる。このことは練り混ぜ時に添加するよりも、小刻みに添加する方が必要量を減少できるという服部⁵⁵⁾の報告と一致する。

(2) レオロジー的考察

従来のスランプによるコンシステンシーの評価では(1)における評価がされる。これに対して、振動状態にあるコンクリートについて球引上げ型粘度計によって評価した場合次のような結果が得られた。

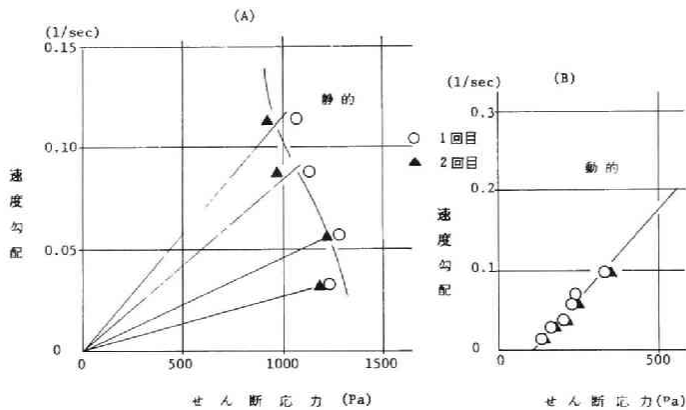


図3.44 静止状態および振動状態における流動曲線

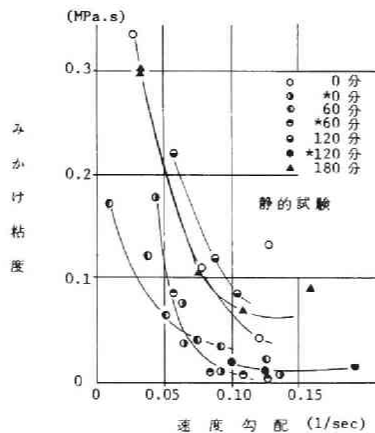


図.45 静止状態におけるみかけ粘度

図3.44の(A)図はコンクリートを静止させた状態で球引上げを行った場合の流動曲線の一例である。今回の実験で用いた速度勾配の範囲ではビンガム流動とならず、チクソトロピックな流動をすることがわかった。また図3.45はこの時のみかけ粘度と速度勾配との関係を示したものであるが、速度勾配がある値以上となるとみかけ粘度は一定値となる傾向にあり、ニュートン流動に近い挙動をするようになる。このことは実験で用いた速度勾配ではオスワルド曲線に近い挙動をしたことになり、ペーストについてオスワルド曲線の存在を示唆した梅屋⁵⁶⁾の研究と同様の傾向が流動化コンクリートにもあることを示唆するものである。このことの工学的な意味は、流動化コンクリートといえども流動させるには最初はある程度の抵抗があるものの流動し始めるとどんどん抵抗は低下し、一定値まで低下すると定常状態の抵抗を示すということになる。これに対して図3.44の(B)図は振動状態にあるコンクリートの球引上げ型粘度計より求めた流動曲線の一例であるが、ほぼビンガム流動に近い流動をしており、本研究では流動化コンクリートに振動を加えた状態をビンガム流体と仮定して、レオロジー量に塑性粘度と降伏値を用いて考察を行った。

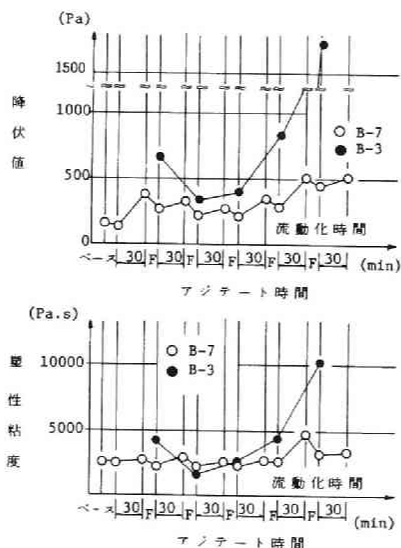


図3.46 流動化剤添加後のレオロジー量

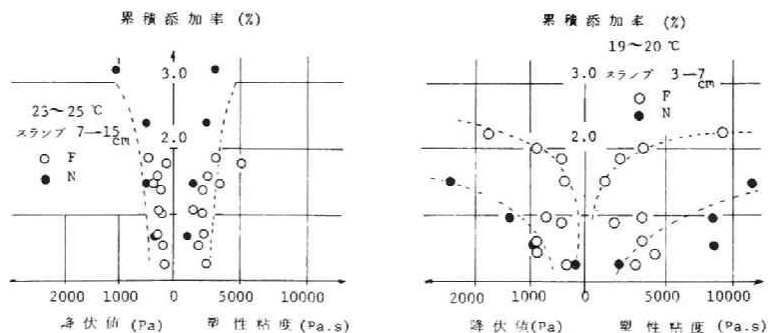
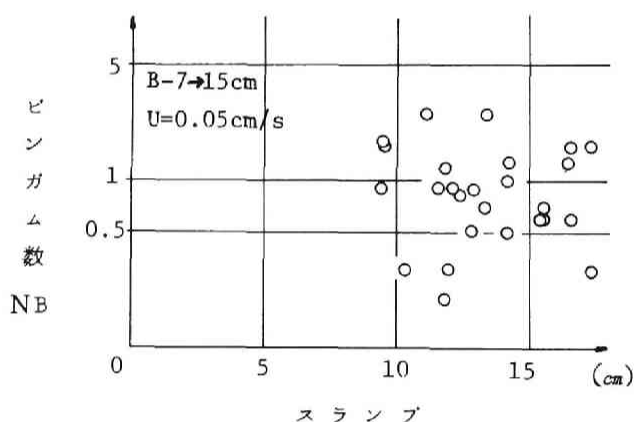


図3.47 累積添加率とレオロジー量の関係 (B-3)

図3.46における各配合の流動化剤添加前後のレオロジー量はスランプ同様の変化を示すが、降伏値が塑性粘度より顕著な傾向が表われている。但しB-3配合は流動化前は荷重計の容量を越すので測定できなかった。しかし時間の経過とともにレオロジー量は増加して行く傾向にあり、特にスランプの小さいものは急激に増加する。図3.47は練り上り温度19～20℃における繰返し添加した流動化剤の累積添加率とレオロジー量の関係を示したものである。縦軸の添加率は時間の経過を意味しており、繰返し添加が進むにつれて、スランプは同一でも、レオロジー量は大きくなりより粘稠になることを意味しており、目視ではあるが粘稠な傾向があり数値的に表現出来たものと思われる。この現象はスランプの小さいものほど著るしく、施工において何らかの対策が必要になるものと思われる。図3.47の傾向は練り上り温度23～25℃、13～15℃のシリーズにおいても同じであり、従って繰返し添加法によりコンクリートを流動化する場合には、スランプのみによりワーカビリティの管理をするのではなく、本研究においては球引上げ型粘度計を用いたが、何らかのレオメーターにより管理する方が良いであろう。最後にビンガム数 N_B はスランプ15cmに流動化したコンクリートの平均値は1.1～10.6の範囲にあり α は0.3～3でAnleyの $\alpha = 7\pi/24 = 0.916$ に近い結果となった。(図3.48)



(3) 振動下のコンクリートの性質を球引上げ型粘度計を用いて解析する場合は、解析式としては球近傍のみが流動する考え方(例えば Ansley 式)を用いるのが適当である。

3 5 結 語

振動下のフレッシュコンクリートの動的挙動を振動式回転粘度計、振動台、球引上げ型粘度計の3種の試験装置を用い種々の条件での振動実験を行った結果をまとめると以下の結論を得た。

(1) 振動下におけるペースト、モルタル、コンクリートは振動機によって与えられる繰返し応力が試料が有するみかけの弾性限界(降伏値)以下であれば粘弾性体として挙動し、みかけの弾性限界以上であればビンガム流動もしくは一時的な構造破壊によりニュートン流動に近い挙動を示す。

(2) フレッシュコンクリートの1次共振振動数は配合条件によって多少違うが100Hz前後に存在し、骨材条件を一定とした場合には水セメント比が小さい配合程高くなる傾向にある。従って、振動機の振動数は水セメント比の小さい配合程高くした方が効果的である。また、加速度及び速度勾配を大きくすると粘性が低下し効果的に締固めを行うことができる。ただし、コンクリートがある程度の弾性成分を有していないと振動源からの振動エネルギーの伝播距離が狭められる。

(3) フレッシュコンクリートの1次共振振動数は経時的に高くなって行く。従って再振動など時間の経過したコンクリートに振動を与える場合には振動機の振動数は共振振動数に追従して高くする方が有効である。

(4) フレッシュペーストやモルタルは水セメント比の小さい配合程振動締固めに対する効果は大きく、また振幅を大きくする方が効果的である。

(5) フレッシュペーストやモルタルの動的レオロジー定数は周波数依存性を有し、周波数特性曲線において上昇曲線と下降曲線は一致せず特に動的損失 G'' にその傾向があり、下降曲線が上昇曲線の上に来ることがありレオベキシーの性質を示す配合がある。即ち微少振動によって粘度が上昇したことになり、微少振動でも固体粒子の沈降が促進されたのかまたはセメント粒子が振動により水和が促進される現象が存在するのか原因を十分解明することは出来ないにしても、レオベキシー現象について今後検討する必要性がある。

参 考 文 献

- 1) ACI Committee 309, "Behavior of fresh concrete during vibration." ACI Jour. committee report, No. ACI 309 1R-81, 1981. (36-53)
 「著者注：フレッシュコンクリートの振動に関する主な文献が63編参考文献に記載されている」
- 2) Bache, H.H. : "The processing of fresh concrete." RILEM Seminar Proc., Vol. 5, 1973. (5.1-1 to 5.1-67)
- 3) Powers, T.C. "The properties of fresh concrete." John Wiley, N.Y. 1968. (477-482)
- 4) Cusens, A.R. and J. Harris. "A rheological study of fresh cement pastes." RILEM Seminar Proc., Vol. 2, 1973. (2.8-1 to 2.8-34)
- 5) 梅屋 薫 ; "セメントモルタルのレオロジー," 土木学会誌, Vol. 64, No. 4, 1979. (215-224)
- 6) Marcovitz, H. ; "A property of Bessel function and its application to the theory of two rheometers." Jour. Appl. Phys. Vol. 23, No. 10, 1952. (1070-1075)
- 7) 前掲の2) p. 5 1-37
- 8) 前掲の3) p. 484
- 9) 前掲の5) p. 217
- 10) 小野木重治著 ; "化学者のためのレオロジー", 化学同人, 1982. (223)
- 11) 梅屋 薫 ; "懸濁系硬化のレオロジー", セメント技術年報, Vol. 30, 1976. (19-29)
- 12) 前掲の4)
- 13) 角田 忍, 明石外世樹 ; "セメントペーストの粘度式について", セメント技術年報, Vol. 32, 1978. (88-91)
- 14) 久保輝一郎ほか3名著 ; "粉体—理論と応用" 日本工業新聞社刊, 昭和39年. (501)
- 15) 平井英二著 ; "化学技術者のためのレオロジー", 科学技術社刊, 昭和53年 (6)
- 16) 日本粉体工業協会編 : "混合混練技術", 日刊工業新聞社, 昭和55年. (2-3)
- 17) Lapasin, R., Longo, V. and Rajgelj, S. ; "Thixotropic behaviour of cement pastes," Cement and Concrete Res., Vol. 9, 1979. (309-318)
- 18) Lapasin, R., Longo, V. and Rajgelj, S. "The effect of water reducer addition on the rheological properties of cement pastes," Proc. of 7th Int. Cong. on the Chem. of Cement, Vol. III, 1980. (VI-135 to VI-140)
- 19) Lapasin, R., Longo, V. and Rajgelj, S. "A thixotropic model for cement pastes," Proc. of 8th Int. Cong. on Rheology, Vol. 3, 1980. (659-664)
- 20) 前掲の13)
- 21) 角田 忍, 藤井 学, 明石外世樹 ; "フレッシュコンクリートの粘度式について" セメント技術年報, Vol. 33. 1979. (227-230)
- 22) 水口裕之 ; "フレッシュコンクリートの流動性に関する基礎的研究" 京都大学工学部博士論文, 1984. (55-111)
- 23) 前掲の19) (259-260)
- 24) Harris, C. M and Crede, C. E., "Shock and Vibration Handbook," Vol. 1. Mac-Graw-Hill Book Co., N. Y., 1961.
- 25) 前掲の2) (5.1-34)
- 26) 前掲の2) (5.1-8)
- 27) 岡田 清, 六車 熙 監修, "コンクリート工学ハンドブック" 朝倉書店, 1981. (270)
- 28) 前掲の27) (271)

- 29) 前掲の27) (275)
- 30) ACI Committee 309, ; " Recommended practice for consolidation of concrete, " ACI, Detroit, 1972, reaffirmed 1978. (40 pp)
- 31) 土木学会 ; " 流動コンクリート施工指針 (案) " 土木学会コンクリートライブラリー51号, 1983.
- 32) L'Hermite, R. and G. Tournon,; " Vibration for fresh concrete. " Technical Publication No. 2 Centre d'Etude et de Recherches de L'Industrie des liants Hydraulique, Paris, 1948.
- 33) Desov, A.E., ; " Structural viscosity of cement and concrete mixes. " Kolloid. Zhur., Vol. 13, No. 5, 1951. (346-356)
- 34) Rebut, P., ; " En base méconnue de fabrication des éléments en béton vibré, " Revue des Matériaux de Construction et des Travaux Publiés, No. 535, 1960. (99-103)
- 35) 明石外世樹, 葛目和宏 ; " フレッシュコンクリートの振動時の粘度について " セメント技術年報, Vol. 26, 1972. (272-274)
- 36) 西林, 矢村, 吉野, 前田 ; " 流動化コンクリートのレオロジー特性に関する 3・3の実験 " セメント技術年報, Vol. 35, 1981. (214-217)
- 37) Legrand, C. ; " Contribution a l'étude de la rhéologie du béton frais, " Matériaux et Constructions, Vol. 5, No. 29, 1972. (275-295)
- 38) Dimond, C.R. ; 前掲の19) (171, 301-302)
- 39) Lassalle, A. and C. Legrand, ; Changes in the rheological behaviour of cement paste with distance from a vibrating source, " Matériaux et Constructions, Vol. 13, 1980. (115-124)
- 40) 例えば中川鶴太郎, 神戸博太郎共著 " レオロジー " みすず書房, 1970. (192-199)
- 41) 前掲の19) (171-172)
- 42) 吉岡, 足立, 石村 ; " 粘塑性流体の球を過ぎる遅い流れについて " 化学工学, Vol. 35, No.10, 1971, (92-100)
- 43) Valentik, L. and R.L. Whitmore ; 前掲の42) (93)
- 44) Ansley, R. and T. N. Smith, ; " Motion of spherical particles in a Bingham Plastic, " AIChE Jour. Vol. 13, No. 6, 1967. (1193-1196)
- 45) du Plessis, M. P. and R. W. Ansley ; 前掲の42) (93)
- 46) Ito, S. and T. Kajiuchi ; 前掲の42) (93)
- 47) 岸谷孝一, 岡 成一 ; " フレッシュコンクリートペーストおよびモルタルのレオロジー定数測定 " 日本建築学会論文報告集, 第305号, 昭和56年 (1-7)
- 48) 前掲の10) (23)
- 49) 岸谷孝一, 菅原進一, 岡 成一 ; " フレッシュペースト, モルタルの流動特性 " 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), 昭和54年. (61-62)
- 50) 坂東洋一, 明石外世樹, 角田 忍 ; " 練り混ぜ時間が高流動化剤を添加したペーストおよびモルタルに及ぼす影響 " 土木学会第37回年次学術講演会講演概要集, V部, 昭和57年. (191-192)
- 51) Banfill, P. F. G. and D. C. Saunders ; " On the viscometric examination of cement pastes, " Cement and Concrete Research, Vol. 11, 1981. (363-370)
- 52) Roy, D. M. and K. Asaga ; " Rheological properties of cement mixes, " Cement and Concrete Research, Vol. 9, 1979. (731-739)
- 53) Hattori, K. and K. Izumi ; " A rheological expression of coagulation rate theory, " Jour. of Dispersion Science and Technology, Vol. 3, No. 2, 1982. (129-193)

- 54) 服部健一；“スランプロスのメカニズムおよびその対策”材料，第29巻，第318号，昭和54年，(34-40)
- 55) 前掲の54) (38-40)
- 56) 梅屋 薫；前掲の11)

第 4 章 フレッシュコンクリートの 縦波伝播特性に関する研究

第4章フレッシュコンクリートの縦波伝播特性に関する研究

4・1 概 説

フレッシュコンクリートの性質を判定する場合、スランプなど自重による相対変形、フローテーブル、Vee-Bee 試験、リモルジング試験など振動や衝撃エネルギーによる仕事量、回転粘度計などの連続せん断による変形など大きなせん断変形を与えて物性値を得る場合が多い。^{1) 2) 3)} しかし一方では、すでに型枠に打設されたコンクリートの品質を判定するとなると型枠内で再び攪拌するなどといったことは、材料分離の発生など部分的に全体の品質とは異ったコンクリートを作成することにもなりかねない。このように練り上ったコンクリート、あるいは型枠に静置された状態のコンクリート品質を攪拌などの大変形なしに判定することは有意義である。このような考えに適する判定法として現在考えられる方法に以下のものがある。⁴⁾

- | | |
|----------------------------------|------------------|
| 1) 弾性波の伝播特性による。 | 5) 水和熱による。 |
| 2) 電気抵抗による。 | 6) 貫入抵抗による。 |
| 3) マイクロウェーブによる。 ^{5) 6)} | 7) エアメータによる変形能力。 |
| 4) 共振法 | |

この中で1) 以外は供試体寸法に制限されたり、熱の発生による温度の影響を無視することはできず、その点、1) の弾性波の伝播特性による方法は発熱を共なわない、品質を変えるような変形を与えない。供試体寸法に捕われないなどの点から最も適していると考えられる。

弾性波によってフレッシュコンクリートの品質を判定しようとするする場合、連続波によるかパルス波によるかという問題があるが、このうち連続波による方法は、コンクリートの寸法や型枠によって、定在波の発生や反射の影響により解析が非常に困難になることが予想される。これに対してパルスによる方法はコンクリート中を伝播して来た第1波ないしは多重反射して来た波について解析すればよいので問題が簡単となりこちらの方が適していると思われる。

それでは、パルス波をどのように発生させればよいかということになるが、パルス波の発生方法については現在まで、各分野で用いられているのは機械的打撃、空気圧、水圧、超音波のインパルスなどがある。このうち空気圧、水圧による方法は装置が大がかりとなり、ある程度現場への適応性を考えると簡便な方がよい。本章ではこの観点に立ち、機械的打撃パルス、超音波パルスによって実験を行ないレオロジー的考察をすることにした。

機械的な打撃によって弾性波パルスを伝播させる方法は長所として、大きなエネルギーをコンクリートに発射できるという点にある。伝播距離が長くなる、すなわち大断面のコンクリートでは有利になる。しかし一方では供試体表面をハンマーで打撃を与える訳であるから均一な打撃が与えられず、高周波成分を含んだパルスとなったり、波頭のくずれた理論解析のむずかしい波形となる。またパルスが伝播するに連れて周波数が低くなって行くという現象が生じたりすることがある。更に機械的に一定のパルスを発射することが困難であることも考慮すべきである。

機械的打撃法は波動法又は単一打撃法とも呼ばれている。⁶⁾ 波動法によったフレッシュコンクリー

トの伝播速度の測定はL. J. Mitchell⁷⁾が $12 \times 12 \times 12$ inの立方体型枠の2つの向い合った側に薄いゴム膜を貼り付けた窓を空け、打撃には振子ハンマーを使いマイクロタイマーを利用した装置による実験を最初に行った。彼の装置では練り混ぜ後10分から20分で測定が可能であった。その結果、初期速度は $120 \sim 180 \text{ m/sec}$ で2～2½時間までゆっくり増加し、その後急激に変化することがわかった。Andersen, Nerenst⁸⁾は6Vのバッテリーによる電動式ハンマーを作動させるコンデンサクロノグラフによって測定した結果、初期速度は 180 m/sec であると報告している。これらの研究は、いずれも1950年頃に行われたものでその後しばらく途絶えていたが1970年に入りフレッシュコンクリートの性質をレオロジー的に評価しようという研究が盛んになり出したことから、我国において波動伝播性状から動的レオロジー定数を求めようという考えから再び見直されるようになった。^{9) 10)} 著者らは $1000 \times 1000 \times 500 \text{ mm}$ の容量の防水ベニヤ板の容器中に厚さ200 mmの発泡スチロールを内部に敷きつめ、ビニールシートを敷き内部容量 $600 \times 600 \times 300 \text{ mm}$ の容器の側面中心部に $\phi 19 \text{ mm}$ のパイプを通し $50 \times 50 \text{ mm}$ の打撃板を $\phi 13 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ の丸鋼の両面に溶接した装置に、打撃面に平行になるように距離200mm, 400mmの地点にピックアップを埋設して打撃ハンマーが鋼製の打撃面に接地した時、メモリスコープの光点がシングルスイープするようにしておき、コンクリート中を伝播したパルス波のピックアップ間の伝播時間差により測定を行った。その結果初期速度は $30 \sim 60 \text{ m/sec}$ 、3時間で $90 \sim 150 \text{ m/sec}$ で配合の違いによる差は見られなかった。この方法はハンマーによる打撃によるため波形が安定せず結果のばらつきが大きい、コンクリートの場合打撃により全体が剛体的に動くなどの短所があることが確認された。またその後の確認実験として、打撃を振子により行うこととし、振子の角度を数種類に変化させると図4・1写真4・1のような結果となり、この方法によると打撃エネルギーによって各値に相違が

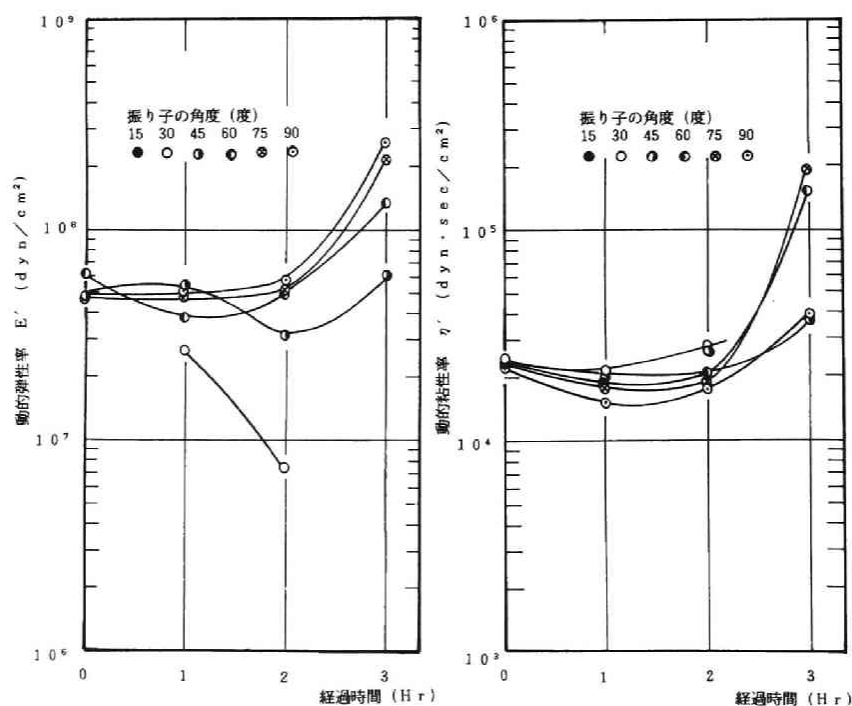


図-4.1 振り子ハンマーの角度と動的弾性率 E' および動的粘性率 η' の関係 (W/C=30%ペースト)

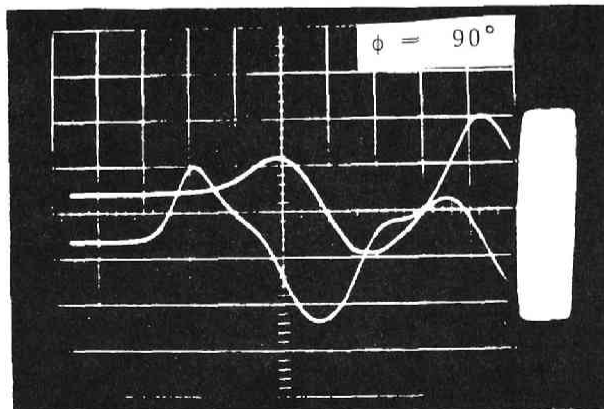
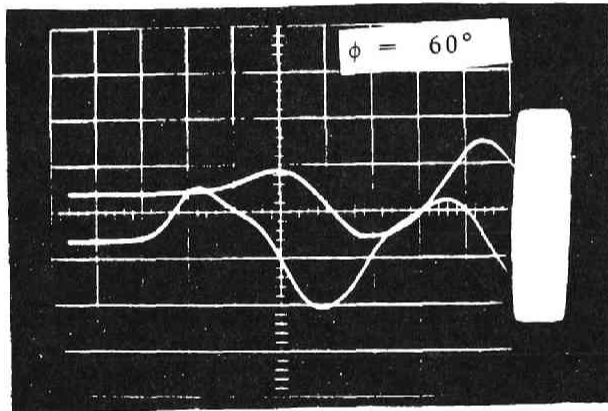
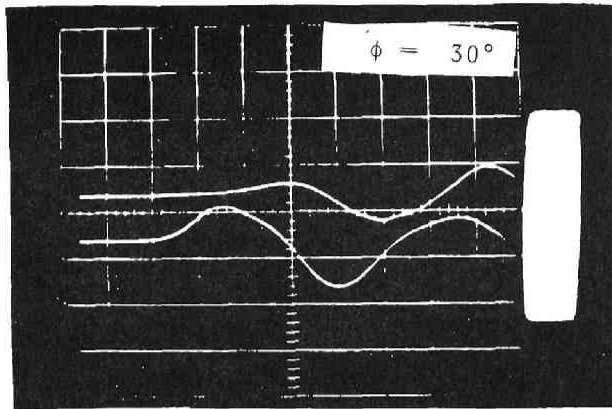


写真4.1 振り子ハンマーの角度と受振破形
 ($V = 0.2 \text{ mV/div}$, $H = 0.5 \text{ msec/div}$)

生じることからも難しさがうかがえる。従って試料を乱すことなく一定のパルス波をコンクリート中に伝播させるには、駆動子として、電磁的なものを使用するか超音波の衝撃波を利用するかである。超音波パルス法は、その弾性波動の媒体として、固体、液体、気体のすべてが利用でき、波長が短いため指向性が得られ、これによりつくられた波束が直進性を持つことを考えると、その点有利である。現在まで硬化したコンクリートについては強度特性や配合、寸法、ひび割れ、鉄筋量などを超音波法によって推定しようという研究は数多くなされて、その成果もかなり精度の高いものがえられるようになっている。特に縦波速度を利用するものは米国においてはASTM C597-68T、英国においてもBS4408-part 5に規格化されるに至っている。

フレッシュな段階における縦波速度の研究は1950年代に伝播速度の経時的変化と凝結時間とを関連付けようとするWhitehurst¹³⁾の研究から始まり、Cheesemen¹⁴⁾、Jones¹⁵⁾らによって手がけられた。これらの研究は図4・2のWhitehurstの結果にもみられるように、そのほとんどがプラ

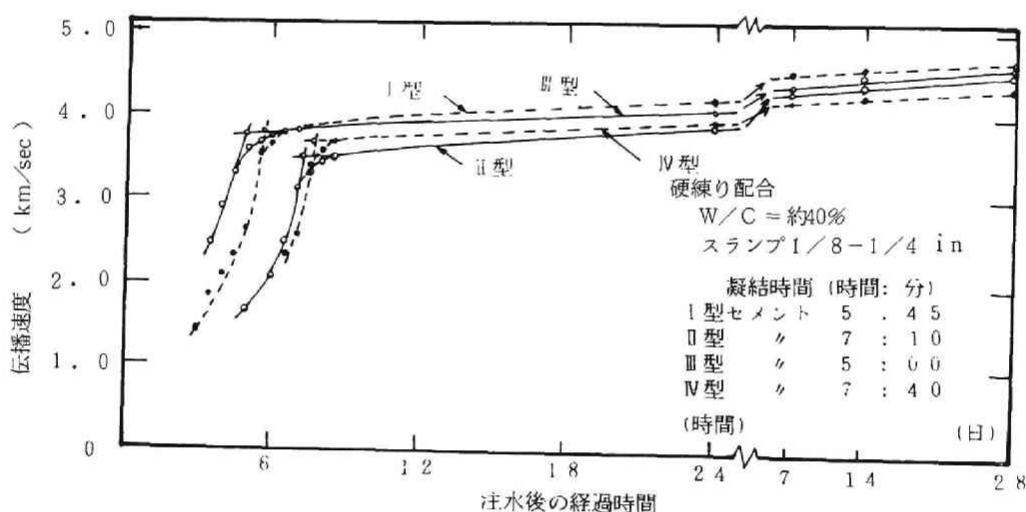


図-4.2 縦波速度試験からのコンクリートの凝結評価 (Whitehurst¹³⁾)

スチックな段階から経時的に行なった測定結果の報告程度に終っていて、単に凝結時間の音響的な定義づけの提案に留まっている。しかし近年になってコンクリート品質の早期判定に関する要求の高まりから、再び脚光を浴びることとなり、多くの研究が行われることとなった。¹⁶⁾⁻²³⁾特徴ある研究として、ElveryとIbrahim²⁴⁾は超音波の伝播速度とコンクリートの早期圧縮強度との関係を明らかにするために膨大な実験を行っているが材令5時間程度以後のコンクリートについて測定している。²⁵⁾Mailarは舗装コンクリートの厚さを反射法により測定する実験において練り混ぜ直後から24時間までの速度を測定している。²⁶⁾Haasらはペーストやモルタルの乾燥収縮と硬化過程に関する研究において材令1時間から50時間までの超音波の伝播速度を測定しているが速度が周波数に依存することを指摘している。

このように研究が増加しつつある中で練り混ぜ直後における超音波縦波の波動性状についての研究はほとんどなく縦波の減衰が大きいこともあって不明な点が多い。

本章では練り混ぜてから3時間程度までのコンクリートが有する物性を超音波の縦波伝播挙動より解析し、配合要因と伝播速度、動的弾性率、動的粘性率との関係を明らかにする。

4・2 コンクリートの配合特性と縦波伝播速度

4・2・1 はじめに

概説でのべたように本章における縦波の超音波によることとしたがここで超音波の特徴について説明する必要がある。超音波は可聴音波以上の周波数を有する音波を指すが通常20 kHz以上を超音波と呼ぶ場合が多い。しかし超音波は媒質中を伝播する弾性波であるから工学的には約10 kHz～300MHz程度の範囲のものを使っている。媒質中を伝播する縦波および横波は媒体のヤング率E、剛性率G、体積弾性率K、密度 ρ 、ポアソン比 μ とすると縦波速度Vl、および横波速度Vsは次式により求まる。

$$Vl = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} = \sqrt{\frac{1}{\rho} \left(K + \frac{4}{3} G \right)} \quad (4 \cdot 1)$$

$$Vs = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\mu)}} \quad (4 \cdot 2)$$

また音の強さIは一方向に進む平行平面波とすると進行方向に直角な単位面積を単位時間に通過するエネルギーで表わされ次式により求まる。

$$I = \frac{1}{2} \rho c v^2 = P V = \rho c V^2 \quad (4 \cdot 3)$$

ここでvは媒質粒子の速度振幅、cは音波の速度、Pは音圧の実効値、Vは媒質粒子の速度の実効値で ρc を固有音響インピーダンスと呼んでいる。また音波は減衰する。音源から距離xにおける音の強さIは

$$I = I_0 e^{-\alpha x} \quad (4 \cdot 4)$$

となり α 減衰係数と呼んでいる。

次に超音波の指向性である音源を半径Rの円板とすると音の開き角 θ は波長 λ とすると $\sin \theta = 0.61 \lambda / R$ となり、 λ が短い程鋭い指向性を有することになる。

固有音響インピーダンスが各々 $\rho_1 c_1$ 、 $\rho_2 c_2$ となる媒質を境界において平面波が垂直に入射するとき反射率 β_r および透過率 β_t は

$$\beta_r = \left(\frac{\rho_1 c_1 - \rho_2 c_2}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} \right)^2 \quad (4 \cdot 5)$$

$$\beta_t = \frac{4 \rho_1 c_1 \rho_2 c_2}{(\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2)^2} \quad (4 \cdot 6)$$

となる。屈折は光と同じで入射角 θ_1 、は屈折角 θ_2 とすると

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{c_1}{c_2} \quad (4 \cdot 7)$$

なる関係がある。このように超音波は直進性を有する弾性波であるからコンクリートの既知距離間の伝播時間さえ測定してあれば伝播速度が計算でき(4・1)(4・2)式より弾性率、剛性率といったそのコンクリートが有する性質がすぐに求まる。したがって配合によってコンクリートの伝播速度は影響され、2章において述べたように剛性率の逆数はやわらかさの程度(modulus of softness)を表わすものであるからコンクリート可動性(mobility)を数量的に表現することが可能となる。

この節では縦波伝播速度と配合要因との関係について実験的に明らかにしフレッシュな段階における伝播速度式について検討した

4・2・2 実験方法

(1) 実験装置

超音波は概説でも述べたように、その鋭い指向性と高い振動数という特徴を有することから工学的には水中ソナー、探傷器、厚み計、干渉計、流速・流量計、液面計、粘度計、応力分布の測定、水中通話、硬度計、遅延線、²⁷⁾ 浮波器、パルスによる診断、ドップラー法による診断、物性研究、光学的应用など通信的に利用されており、高い振動数に着目した洗浄機、乳化、メッキ、アルミのハンダづけ、疲労試験、溶接、孔あけ加工、切削加工、塑性加工、鋳造、粉体の圧縮押出成形、集塵、熟成、細菌・²⁷⁾ ビール・血球の破壊、治療(手術)、治療、燃料油の改質などの動力的な利用のされかたをしている。硬化コンクリートの非破壊試験法には通信的応用の水中ソナー、探傷器、厚み計と同等の使われ方をしている。フレッシュコンクリートの縦波伝播挙動を測定することは基本的には硬化コンクリートの非破壊試験法と同じであるから、フレッシュコンクリート独特の問題さえ解決しておけば硬化コンクリート用超音波測定器が実験装置として利用できる。フレッシュコンクリート独特の問題とは、一般の配合であれば試料は自立しないということと減衰が大きいということ、それに関連して伝播速度が遅いということである。

測定器は図4・3のブロックダイアグラムに示される超音波パルス法の測定装置で、ソニック

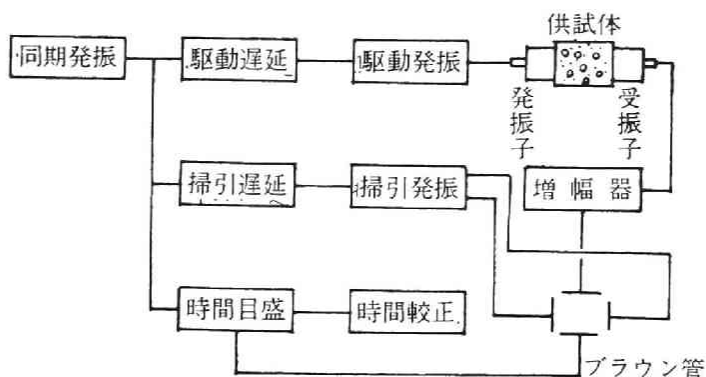


図-4.3 超音波パルス法ブロックダイアグラム

デスター、ウルトラソニスコープなどと呼ばれているものであり我国においても何種かのものが市販されている。超音波の発振器には自励発振形と主発振電力増幅形があるが実験用には後者が一般に用いられている。²⁸⁾ 最近では、英国製のPUNDIT (Portable Ultrasonic Nondistructive Digital Indicating Tester)²⁹⁾のようなデジタル表示式のものが普及してきたが、フレッシュコンクリートのように減衰が大きいと波形の立ち上り利得が鈍く、波形観測型でないと誤差は大きい。本研究では図4・3のブロックダイアグラムにおける増幅およびブラウン管の部分に0.05 mV/divまで増幅可能な2ビームオシロスコープを用いる波形観測型の超音波パルス試験装置を用いた。次に振動子に何を用いるかであるが振動子の種類には圧電振動子、電歪振動子、ランジバン型振動子、磁歪振動子がある。これらの振動子にはそれぞれ特徴があるがフレッシュコンクリートの実験にはどれを用いても良い。本研究では取扱いが簡単で、入手しやすく自由な形状が選べる、円板形の場合直径が100 mmのものまで得られる、またインピーダンスが低いなどの点から電歪振動子であるチタン酸バリウム系磁器 (BT) またはジルコンチタン酸鉛系磁器 (PZT) を用いた。次に周波数をいくりにするかであるがフレッシュコンクリートの粘性や散乱減衰が大きいという性質上100kHz以上では透過しにくいので本研究では20 kHz~100kHzの振動子を用いることにした。ただしこの範囲ではキャピテーションが発生しやすくなるということも考えられるが1 定間隔でパルスを発射する方式にしてあるから問題はない。また低い周波数の場合指向性が問題となる。4・2・1で述べたように指向性は λ/R できまるので波長が長くなる分振動子の半径を大きく取ってやれば良く、減衰は少なくするために周波数を下げた分は振動子の半径を大きくするという方法は深海用水中ソナー等に適用されている。波長が長くなったことにより多少指向性は悪くなるが逆に気泡や空隙による散乱が少なくなり、フレッシュコンクリートの測定には、低い周波数の方が適している。チタン酸バリウム系振動子の周波数定数は 2,600 kHz・mmであるから20 kHzでは厚さ130mm, 50kHzでは52mm, 100kHzでは2.6mmとなり相当ぶ厚くなるので20kHz用としてはボルト締めランジバン型として2個の金属ブロックを付け共振周波数を下げる方式が取られている。次に、受振子には振動子と同じ性能を持つ振動子を用いた。概説で述べられたように伝播速度が遅いという点について注意を払わなければならないのは、フレッシュコンクリートが自立しないので型枠が必要であるということである。この型枠に用いる材質にもよるが数千 m/secの伝播速度を有しているものでは伝播速度の測定において型枠を伝わって来たパルスによって影響を受ける可能性がある。振動子の指向性が良ければ問題はないのであるが低い周波数を用いているので多少の考慮は必要である。初期においては木製の型枠を用いたが振動面および受振面をスポンジ、発泡スチロール、発泡ウレタン等により (ローシーゴムでもい) 振動子、受振子を包んでやれば木製でなくてもプラスチック製でも良いことが解ったので本研究の実験における型枠の基本形としては、図4・4のようなプラスチック円筒の逆T型を採用している。中央の煙突部は、試料から振動子に与える内圧を一定にするためのものである。なお、型枠中を超音波が伝わっているかどうかの確認は空の状態で発振させ空中を透過させて波形を観測し、中間に障害物 (手でよい) を入れて波形が消えることを確認すればよい。ここで音波について定義すると「音波とは弾性によって起る波動のこと」であるとし「超音波とは人間の耳で聞くことを目的としない音波のこと」である。音波パルスの伝播速度の測定は図4・5で示すように、

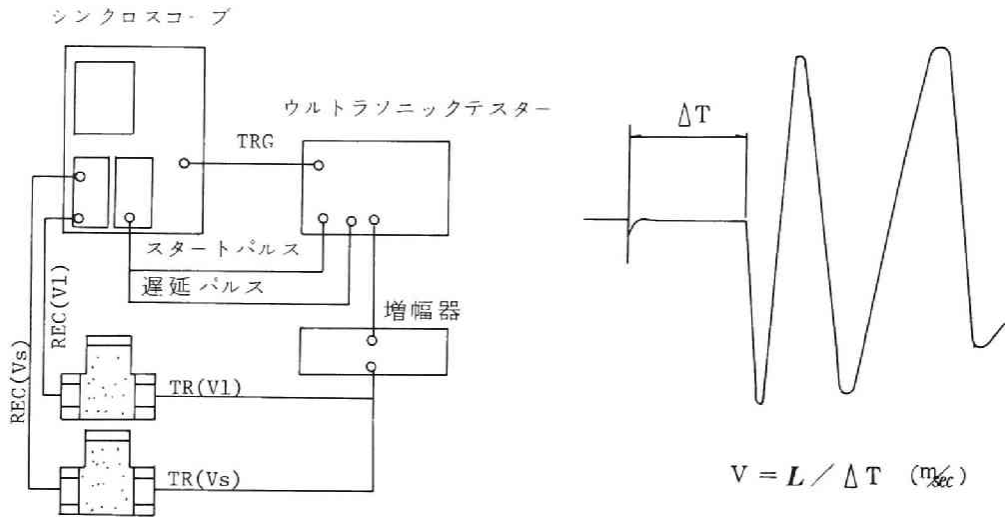


図-4.4 超音波パルス法測定装置

図-4.5 伝播速度の測定

同期発振点より波形が立ち加る点までの時間 ΔT を時間目盛波形を重ね合わせるによりブラウン管上で読み取る。ここに ΔT は伝播時間で発・受振子間距離を L とすると、伝播速度 V は次式により求まる。

$$V = L / \Delta T \quad (4 \cdot 8)$$

(2) 縦波伝播速度の測定

フレッシュコンクリートの縦波伝播速度に影響する因子は、はなはだ多いが特に影響すると思われる因子は次の諸項であろう。

- イ) セメントペーストの濃度、すなわち水セメント比
- ロ) コンクリート中の骨材量、細骨材率
- ハ) コンクリートの構成材料の品質、すなわちセメント、砂、砂利の性質
- ニ) セメントの水和反応の程度、すなわち養生条件（温度、湿度）、材齢
- ホ) コンクリート密度、すなわち締固めの程度
- ヘ) その他；セメントの風化程度、練混ぜ方法、空気量、混和剤

このように多くの因子の中で練混ぜ直後から、凝結を始める数時間までの不安定な状態の中ではセメントペーストの水和過程が大きな位置を占めるものと思われるので、本節では以下の実験を行うこととした。

- a) スランプを変化させる。(A, B配合)
- b) 水セメント比を変化させる。(C, D, E配合)
- c) 空気量を変化させる。(M-I配合)
- d) セメントの種類を変化させる (M-I配合)
- e) 骨材量を変化させる。

(3) 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメント，早強ポルトランドセメント，超早強ポルトランド（いずれも日本社製）を使用した。セメントの物理試験結果および化学試験成績を表4・1，表4・2に示す。

表-4.1 セメントの物理試験成績

物 理 試 験 成 績 表						
種 類	比 重	粉 末 度		凝 結 試 験		安定性
		比表面積 (cm^2/g)	88 μ 残分 (%)	始 発 (時・分)	終 結 (時・分)	
普通ポルトランドセメント	3.15	3130	3.4	2 - 41	3 - 45	良
早 強 セメント	3.13	4100	0.8	2 - 36	3 - 56	良
超 早 強 セメント	3.14	5080	0.2	1 - 50	3 - 00	良

骨材は，河川産天然骨材で物理試験の結果を表4・3に示す。骨材は細・粗骨材とも表乾状態で用いた。粗骨材の最大寸法は10mmとした。

AE剤はビンゾールレジンを用いた。

(4) 配合および測定条件

配合条件については表4・4に示す。セメントの種類および空気量に関する実験はコンクリー

表-4.2 ポルトランドセメントの試験成績

種 類		普 通	早 強	超 早 強
項目		セメント	セメント	セメント
化学 成 分 (%)	強熱減量	0.6	0.8	0.8
	不溶残分	0.2	0.2	0.5
	SiO ₂	22.0	20.8	20.4
	Al ₂ O ₃	5.5	5.0	4.9
	Fe ₂ O ₃	3.0	2.8	2.7
	CaO	64.8	66.0	65.2
	MgO	1.4	1.2	1.3
化組 合 物 (%)	SO ₃	1.9	2.8	3.4
	C ₃ S	50	66	64
	C ₃ A	9	8	8
	C ₂ S	26	10	10
	C ₄ AF	9	9	8
比 重		3.17	3.13	3.13
比表面積(cm^2/g)		3230	4350	5910

表-4.3 骨材の物理試験結果

試験 骨材	比重	吸水率 (%)	粗粒率	単位容積重量 (Kg/m ³)	空隙率 (%)
細骨材	2.64	2.06	2.81	1725	37.6
粗骨材	2.65	0.95	6.83	1665	38.4

表-4.4 コンクリートの配合

	M.S (mm)	Sl (cm)	air (%)	W/C (%)	s/a (%)	W (Kg/m ³)	C (Kg/m ³)	S (Kg/m ³)	G (Kg/m ³)
A	10	3±1	1.0	55	52.8	191	347	880	790
B	10	11±1	1.0	55	49.9	202	376	848	855
C	10	-	1.0	30	50	150	500	900	900
D	10	-	1.0	45	50	180	400	900	900
E	10	-	1.0	85	50	225	265	900	900
M-1	5			45		347	767	1725	
M-2	5			85		431	508	1725	

ト中のモルタル分について行うこととして表中のM-1配合を基本として用いている。測定は注水から練り混ぜ、型枠への打込みとこの間10分前後かゝるので型枠静置時間を測定開始時間とした。測定は恒温室(20±1℃, 60%RH)内で行なった。

4・2・3 実験結果

(1) スランプと縦波伝播速度の関係

スランプ試験はフレッシュコンクリートのコンシステンシーを調べるために現在まで最もよく使用されている方法である。コンシステンシーがその語句の本来意味するところの「非ニュートン材料の変形に対する抵抗性、あるいは硬さの程度³²⁾」と考えるならば、ビンガム材料の降伏値あるいは2章において説明されたせん断弾性係数と直接関係する。したがって(4・1) (4・2)式のEもしくはGと直接または間接に関係すると考えられるのでスランプの違いが縦波伝播速度に影響するものと考えられる。

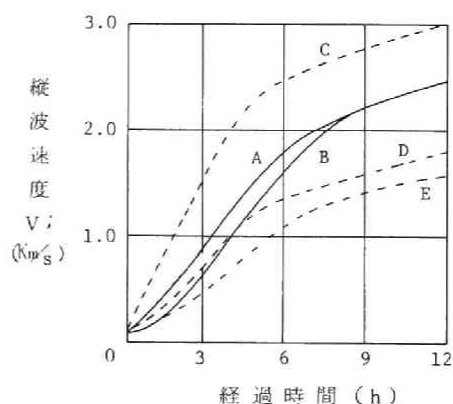


図-4.6 コンクリートの縦波伝播速度
(A, B: スランプ C, D, E: W/C を変化
表-4.4の配合)

図4・6は表4・4のAからE配合について行った実験結果である。図においてスランプを3cmとしたA配合と11cmとしたB配合について考察してみる。両配合は水セメント比が55%と同一にしてある。練混ぜ直後において両配合の伝播速度に差はなくても6, 7時間までは100~200m/secの差があり、硬化するに従って両配合の速度が接近してくる。これは硬化するに従って、水セメント比が同一であることから強度特性もほぼ同じ状態となり、動弾性係数やポアソン比も近接することによるものと考えられる。以上の結果からスランプの違いは凝結・硬化初期の段階においては縦波伝播速度に影響するといえる。

(2) 水セメント比と縦波伝播速度

全骨材の占める容積、細骨材率を一定とした場合ペーストの濃度によってコンクリートの伝播速度がどうなるのか、即ち、骨材の間隙率一定とした場合のペーストの影響はセメントの水和反応速度とコンクリートの伝播速度との関係を知る上で興味深い。図4・6中に総骨材量一定、細骨材率一定にして水セメント比が30% (C配合)、45% (D配合)、85% (E配合) の3種類について経時変化を載せている。水セメント比の違いが縦波伝播速度に大きく影響しているのがわかる。測定開始時においてどの配合も100~150m/secであった。この理由の説明は後節において行う。水セメント比による速度差は45%と35%の差と比較すると水セメント比が小さくなる程速度差が大きくなることを示している。この理由はペーストの性質が水セメント比45%以下では水が不足した状態のfunicular域となる為、ペーストが固体的性質を表す比率が増加するので偽かの水セメント比の差が伝播速度の増加を導く。また水和の影響がすぐに出やすくなる。これに対して水セメント比45%以上になると水和に不慣れた余剰水が増加するので水和による強度発現が遅れるし、水セメント比が大きくなるにつれて降伏値や粘度は低下するからSlurry域にあるペーストの固体粒子を分散・懸濁しておく能力が低下し粒子の沈降を早める。このことは逆に粒子間の接触点の増加に結びつき、伝播路が確保されることになり、速度は水セメント比45%以下でみられたような比率では低下しないと考えられる。

次にD配合とE配合におけるモルタル部分について実験を行った。図4・7はD配合中のモル

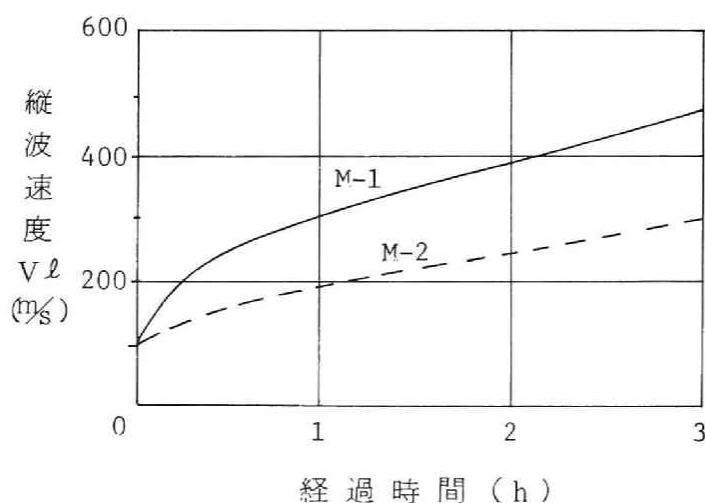


図-4.7 モルタルの縦波伝播速度 (表-4.4の配合)

タル（M-I配合）とE配合中のモルタル（M-2配合）の3時間までの縦波伝播速度である。モルタルの測定開始時における速度は水セメント比に関係なく100m/sec前後であった。モルタルは10分位から明瞭に水セメント比の影響が表われてくる。またモルタルはコンクリートに比べて速度は遅い。モルタルはコンクリートに比べてバラツキが少ないという結果が得られた。この結果についての考察は4・2・4で行なう。

（3）空気量と縦波伝播速度の関係

フレッシュコンクリート中に空気を連行した場合の空気量と伝播速度の関係について、M-I配合のモルタルにAE剤を混入して伝播速度の経時変化を3時間まで測定した。図4・8に測定結果を示す。Jones³³⁾は硬化コンクリートの空気量と伝播速度の関係について4%までは増加さ

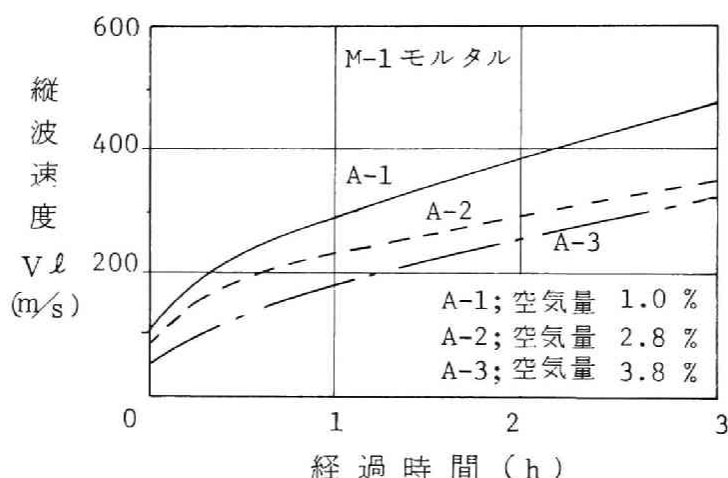


図-4.8 モルタル中の空気量を変化させた場合の及ぼす影響（表-4.4の配合）

せるが8%以上では低下すると述べているが、フレッシュな段階においては空気量が増せば速度は低下するという結果が得られた。

（4）セメントの種類と縦波伝播速度の関係

早強ポルトランドセメント、超早強ポルトランドセメントを使用すれば、普通ポルトランドセメントを使用した場合より水和は促進されるから、縦波伝播速度も早くなるものと思われるがフレッシュな段階において測定した実例はほとんどみない。そこでM-I配合のモルタルについて実験を行った。図4・9は測定結果である。図において練り混ぜ直後は各モルタルとも100m/secの速度であったのが時間が経過するにつれて差が出てくる。超早強モルタルはやはり

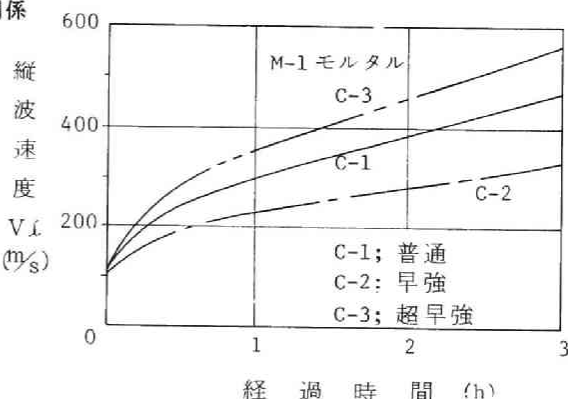


図-4.9 セメントの種類がモルタルの縦波速度に縦波伝播速度（表-4.4の配合）

急速な速度増加をしているのに対して、早強モルタルが普通モルタルより下まわる結果となった。従って、練混ぜて3時間程度のモルタルでは、超早強ポルトランドセメントなどのように超早硬性のセメントを用いた場合には速度増加も大きい、それ以外のセメントを用いる場合には普通ポルトランドセメントを用いたモルタル又は、それ以下の速度増加であるといえる。この結果はCassonの結果とも一致しているが彼はこの点に関しては何も言及していない。

(5) 骨材量と縦波伝播速度の関係

モルタルあるいはコンクリート中の骨材量が縦波伝播速度にどのような影響を及ぼすのかを知ることはフレッシュコンクリートの品質判定上興味深い。図4・10および図4・11はモルタルおよ

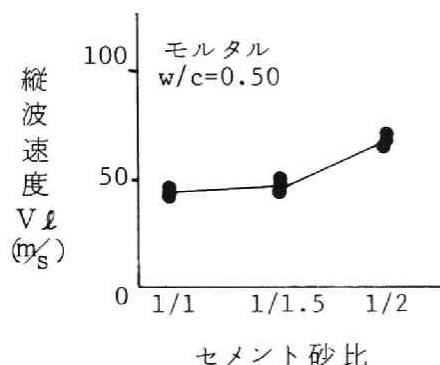


図-4.10 モルタルの練り混ぜ直後の縦波速度

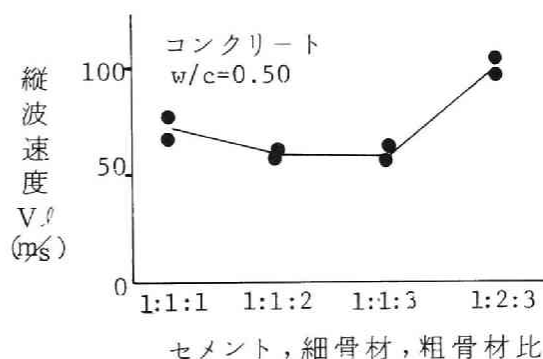


図-4.11 練り混ぜ直後のコンクリートの縦波速度

びコンクリートの水セメント比を50%と一定にした場合の骨材量と、練り混ぜ直後における縦波伝播速度の関係を示したものである。図4・10より明らかなようにモルタルの伝播速度は僅かであるが骨材量が多くなる程速くなっていることを示している。図4・11において横軸をセメント：細骨材：粗骨材の重量比をとった場合の縦波伝播速度はモルタル分の細骨材量を増す方が、粗骨材量を増すよりも影響が大きいことを示すものである。ここで図における細骨材および粗骨材の合計を総骨材量とした場合、図4・10、図4・11のモルタル、コンクリートはセメント総骨材比を1から5まで変化させたことになる。このように本実験結果から考えるとコンクリートの練り混ぜ直後の伝播速度から骨材量を推定することは極めてむづかしい。

4・2・4 配合と縦波伝播速度の関係式の検討

本節における実験結果は練混ぜ直後においては配合要因による縦波伝播速度への影響は少なく、ほとんどが100m/sec前後になることを示していた。しかし数時間経過すると、各配合要因により伝播速度に差が出てくることも明らかとなった。ここでは配合要因と縦波伝播速度の関係について数式化をはかる。

4・2・3の結果からも推察されるようにセメントペーストの硬化過程が縦波伝播速度に重要な影響を及ぼすことがわかる。図4・12はペーストの縦波伝播速度の材齢9時間まで連続的に測定した結果である。図より水セメント比の違いによる伝播速度への影響は3時間程度から明瞭に表

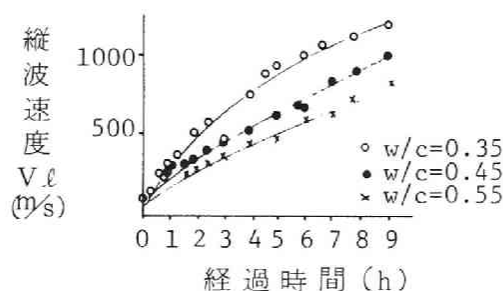


図-4.12 セメントペーストの縦波速度の経時変化

われてくることがわかる。この時期はペーストの凝結開始時期に相当していることは注目される。また測定開始時においては水セメント比の相違による影響はほとんど見られず100m/sec前後になっている。ここで練混ぜ直後のペーストについて考えてみるとペーストは水-セメント粒子分散系のサスペンションであると仮定できる。図4・13は水-セメント系サスペンションにおけるセメ

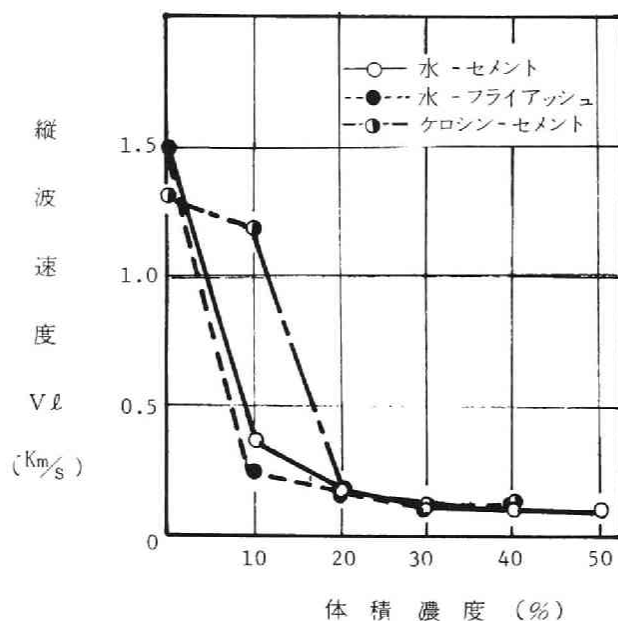


図-4.13 固体分体積濃度の変化と縦波速度

ント粒子の体積濃度を0から50%まで増加させた場合の縦波伝播速度を測定した結果である。図中にはセメントと同程度の粉末度と考えられ水和反応を起こさないサスペンションとして水-フライアッシュ系およびセメントの水和反応を起こさせないためのケロシン-セメント系サスペンションについての実験結果も載せてある。水-セメント系はセメント粒子の体積濃度が0~20%の範囲で急激に低下し30~50% (W/C=74~32%) の範囲で徐々に低下する。図より明らかなように一般の配合に用いられる水セメント比の範囲では練混ぜ直後のペーストの縦波速度にはあ

まり変化がないことがわかる。水—フライアッシュ系は水—セメント系に近い変化を示し、ケロシン—セメント系は希薄な場合は、粒子がすぐに沈降し、上部のケロシン中を音波が透過するので正しい伝播速度を測定することはできないがやはり水—セメント系に近い変化を示している。^{35) 36)} 従ってセメントペーストの縦波伝播速度は水和反応とは関係なく単に分散系の伝播速度について考えれば良いことになる。分散系として考える場合単に水とセメント粒子のみを攪拌しても十分に分散させることはできない。図4・14は練り混ぜ水に高性能減水剤（マイティ150）を1%加え

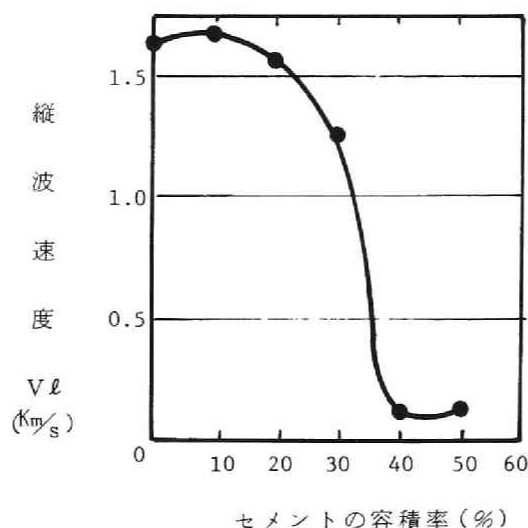


図-4.14 高性能分散剤により分散させた場合のセメントノ体積濃度と縦波速度

た溶液を用いモルタルミキサー（JIS R 5201用）により3分間の攪拌を行った場合の結果である。伝播速度はセメント粒子の体積濃度が10%付近で最大となり、除々に低下した後30%から40%の付近で急激に低下して100m/sec前後となる。そして40%から50%の間では余り増減が認められなかった。図4・15は分散媒に水ガラス、分散質にガラス球（比重:2.50, 平均直径: 4.9mm, 伝播速度: 5660 m/sec）を用いたサスペンションの縦波伝播速度と分散質濃度の関係を示したものである。図から明ら

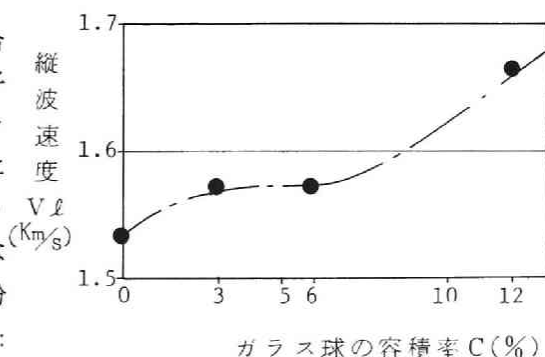


図-4. 15 縦波速度とガラス球（ $\rho = 2.50$ ）の体積濃度の関係（溶媒水ガラス）

かなように、この場合の分散系は一般に考えられているように分散質の増加と共に、伝播速度も速くなっている。以上の結果から推定して水-セメント分散系の伝播速度は、セメント粒子に付着する微細な気泡あるいは練混ぜにより混入する気泡、20~100kHzという周波数領域の超音波パルスによって発生すると考えられる水に溶存している気泡の発生など気泡が何らかの関与をしていると考えられる。ここで、練混ぜ直後のセメントペーストを水-セメント-気泡の分散系と考え、懸濁液の一般式への適用を試みしてみる。

セメント粒子、気泡を分散質、水を分散媒とし、分散質の共鳴周波数が本研究で取り扱う周波数を外れているとする。気泡、セメント、水の容積率を各々 $\phi_b, \phi_c, \phi_w = 1 - (\phi_b + \phi_c)$ 、密度を ρ_b, ρ_c, ρ_w とすると全体のみかけ密度 ρ_b は

$$\rho_b = \rho_b \phi_b + \rho_c \phi_c + \rho_w \phi_w \quad (4 \cdot 9)$$

全体が一様に圧縮されるとして、ペーストのみかけの圧縮率は各々の体積弾性率を K_b, K_c, K_w とすると

$$\frac{1}{K_p} = \frac{\phi_b}{K_b} + \frac{\phi_c}{K_c} + \frac{\phi_w}{K_w} \quad (4 \cdot 10)$$

である。ここで波長が粒子半径に比べて十分長い場合、例えば伝播速度100m/secで20kHzとすると波長は5mm（実際は伝播してくる透過周波数は数kHzであるからこの5・6倍はある4・3・5参照）となりセメント粒子の最大半径を0.05mmとしても100倍になる、ペーストの伝播速度 V_p は次式により求まる。

$$V_p = (K_p / \rho)^{1/2} \quad (4 \cdot 11)$$

ここで $K_b = 1.43 \times 10^6 \text{ dyn/cm}^2$, $\rho_b = 1.29 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$, $K_c = 4.9 \times 10^{11} \text{ dyn/cm}^2$, $\rho_c = 3.15 \text{ g/cm}^3$, $K_w = 2.0 \times 10^{10} \text{ dyn/cm}^2$, $\rho_w = 1.0 \text{ g/cm}^3$ として空気量、セメントの容積率を変化させて計算したものが表4・5である。表より明らかなように、セメント粒子の容積率（水セメント比）よりも空気量の方がはるかに影響が大きいことがわかる。図4・16は容積40%

表-4.5 ペーストの縦波速度に及ぼす空気量の影響

(a:空気量, C:セメントの体積濃度)

$\begin{matrix} a \\ \backslash \\ C \end{matrix}$	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}
0	39.8	120	365	910	1320	1414
0.1	35.8	108.6	332.6	845.6	1225.7	1349.6
0.2	32.8	100.1	307.6	796.2	1214.6	1315.5
0.3	30.4	93.3	287.7	759.0	1194.5	1306.5
0.4	28.5	87.8	274.4	730.6	1192.5	1320.8
0.5	26.9	83.1	257.8	708.9	1210.2	1360.9
0.6	25.6	79.1	246.3	692.2	1244.0	1434.4

(単位: m/s)

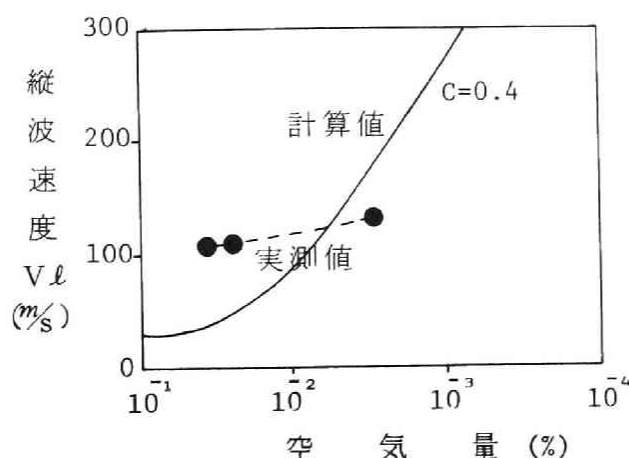


図-4.16 水セメント比40%のペーストの縦波速度に及ぼす空気量の影響

のペーストに気泡が混入した場合の各空気量と伝播速度の関係を示したものである。一般にはセメントペーストには1～2%の空気は混入するので図からもわかるように、この範囲ではほとんど100m/sec前後になる。図中における実測値は空気量が多くなると理想的水セメントー気泡の分散系とならないことを示しているが、いずれにしろ、空気の混入がこの時期の伝播速度を支配しているといえ、練混ぜ直後において伝播速度のみで品質の判定や配合を推定するには空気量を余程正確に測らないと誤差の大きな結果をもたらすことになる。

分散系の音波伝播式としては(4・10)を一般化して粘弾性媒質に粘弾性体球が分散している場合について(したがって K, G, V は複素数)³⁷⁾の拡張は岡野によって行われているが分散質の体積濃度が非常に小さい場合についてのみ適用できる式であるのでペーストには使用できない。^{38) 39)}粘性液体中に弾性球が分散している場合についてはUrick-Ament³⁸⁾によって体積濃度が小さく分散系へ適用できる式として次式を提案している。

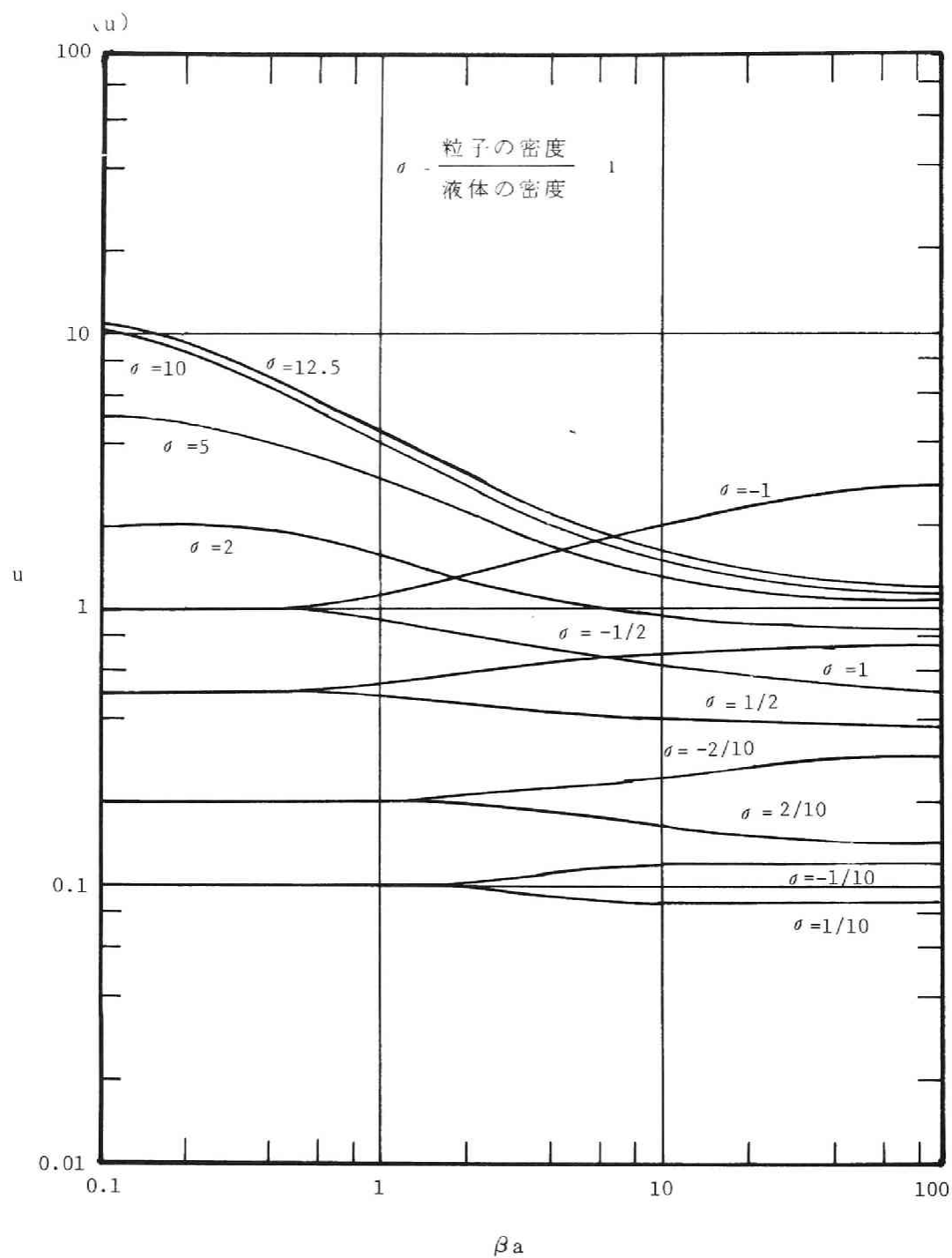
$$U = U_0 \frac{1 - \frac{1}{8} \left(\frac{v\phi}{1+u\phi} \right)^2}{\sqrt{(1+\tau\phi)(1+u\phi)}} \quad (4 \cdot 12)$$

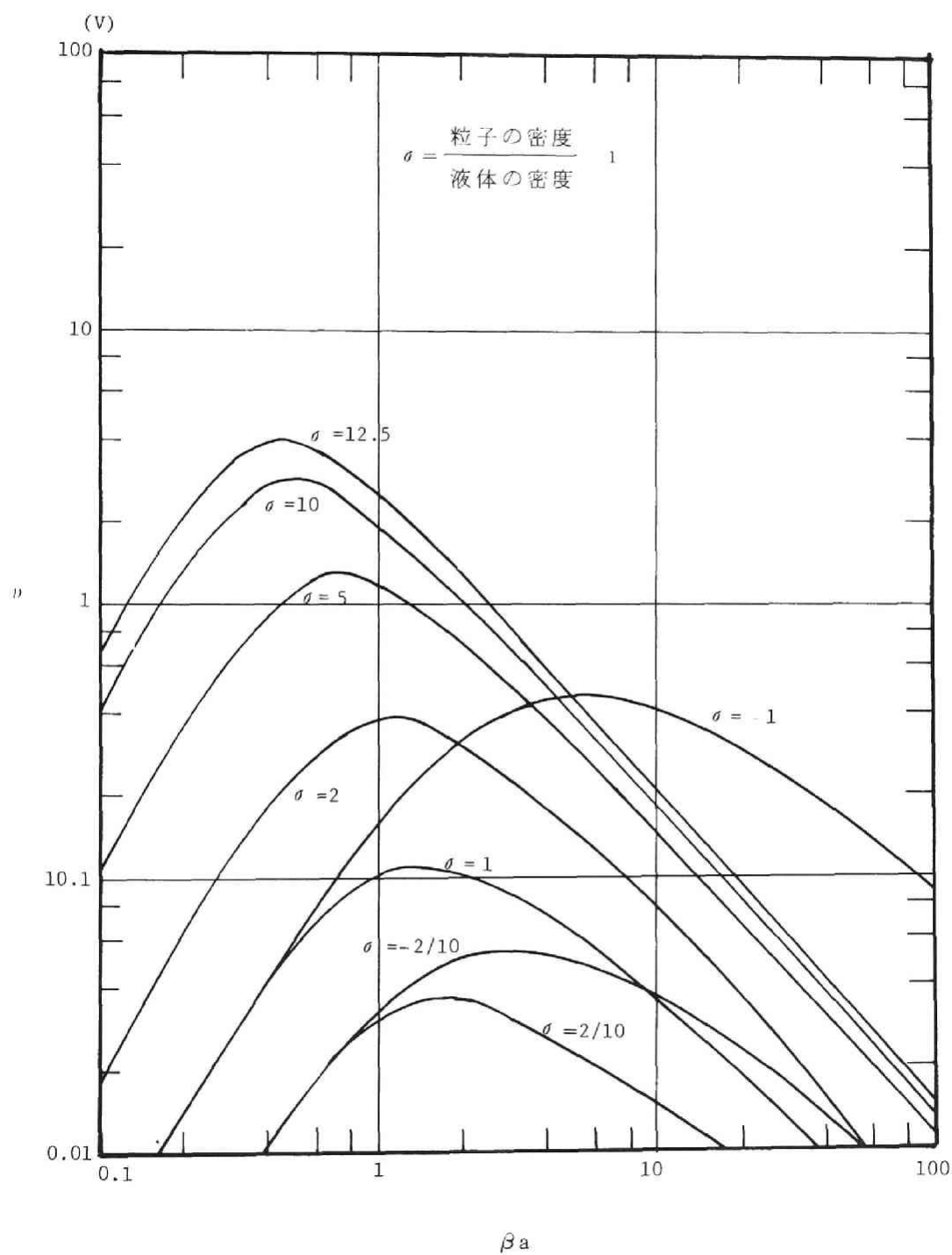
ここで U, U_0 は分散系の速度および溶媒中の音速、 ϕ は溶質の体積濃度、

$$\tau = \frac{\beta_p - \beta_w}{\beta_w} \quad (\beta_p, \beta_w \text{ は各々溶質, 溶媒の圧縮率}),$$

u, v は $\beta d = (\pi f \rho_w / \eta_w)^{1/2} \cdot d$ の関数で図4・17, 図4・18より求まる。今ここで表4・4の計算で使った値を用い、水の粘度を1 cP (20℃)、音速を1497m/sec (20℃)としセメント粒子の圧縮率 β_p を $2.04 \times 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{dyn}$ $\sigma = (\rho_p - \rho_w) / \rho_w = (3.15 - 1.00) / 1.00 = 2.15$ としてペーストの実測値と計算値を比較してみたが、この式も ϕ が非常に小さい場合にしか適用できないことがわかった(図4・19)。以上によりペーストの配合を音速により推定するのは(4・11)式によりできるが空気量を相当正確に測らないと有意な差が出てこないといえる。

図4・20は十分に締め固めた骨材間隙のセメントペースト濃度を变化させた場合の縦波伝播速度である。間隙率一定の状態すなわち骨材量一定の状態で図のように速度が変化するということはコンクリートやモルタルの伝播速度はペーストの伝播速度によって影響されると考えられる。

図-4.17 βa と u の関係

図-1.18 βa と v の関係

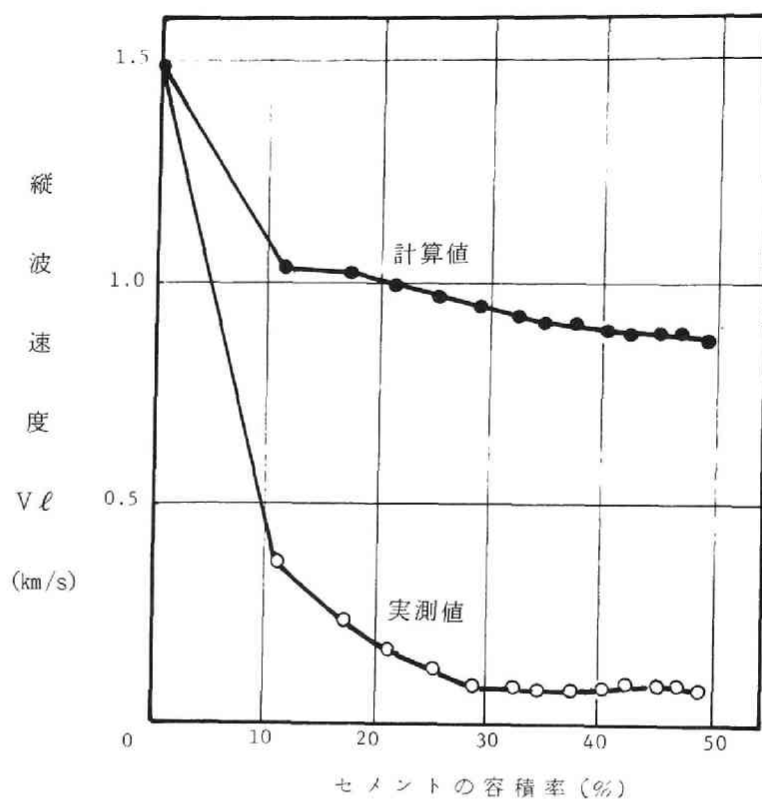


図-4.19 Urick, Arment式と実測値との比較

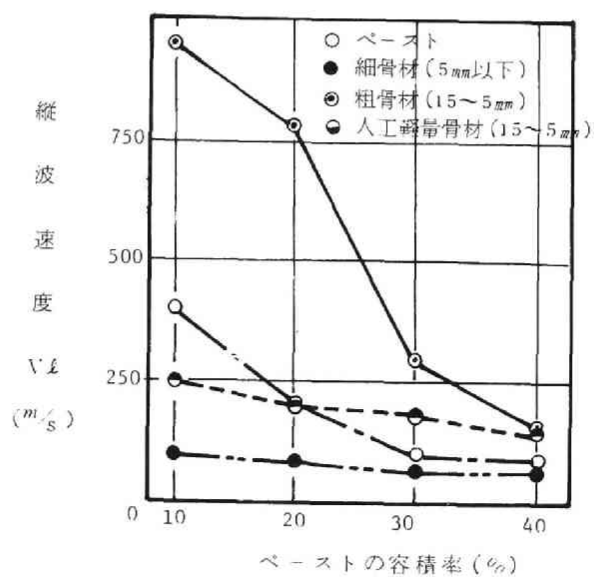


図-4.20 各種骨材の間隙のペースト濃度を变化させた場合の縦波速度

40)
粒状体の間隙を液体で充した場合の伝播速度についてWyllieらは種々の粒径からなる物質の集合体について次の実験式を提案している。

$$1/V_n = n/V_f + (1-n)/V_s \quad (4 \cdot 13)$$

ここで n は間隙率、 V_n は粒状物質の伝播速度、 V_f は間隙を充す液体の伝播速度、 V_s は実質部の伝播速度である。この式のフレッシュコンクリートの伝播速度への適合性を調べるために次のような実験を行った。写真4・2に示す型枠に5mmから15mmの範囲の骨材（骨材の伝播速度 $V_s=3900\text{m/s}$ ）を締め固め（ $n=0.386$ ）間隙にペーストを注入して縦波伝播速度を測定した。また同時に注入したペーストの伝播速度も測定した。結果は図4・21に示すようにペーストの伝播速度を実測して（4・13）式に代入した計算値と実験値はほぼ一致する結果となった。またこれを確認するため、コンクリートを二相体と考え図4・22のようにペースト中に模型骨材を入

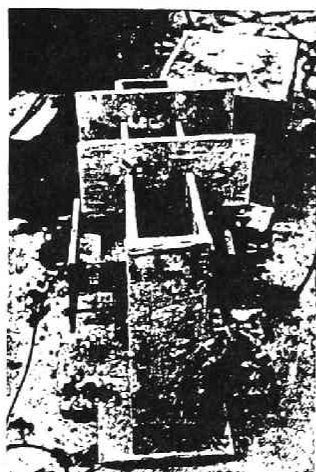


写真-4.2 実験型枠

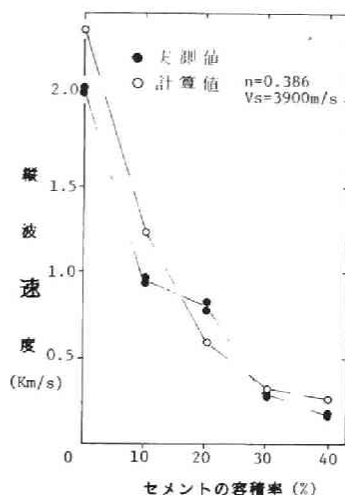


図-4.21 粗骨材の間隙に注入したペースト濃度が縦波速度に及ぼす影響

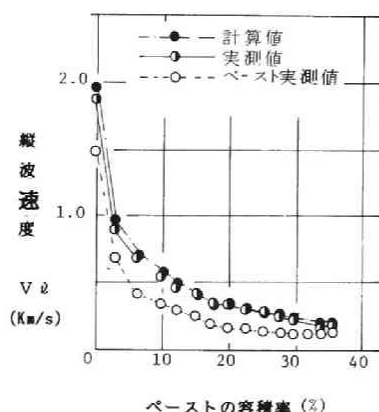
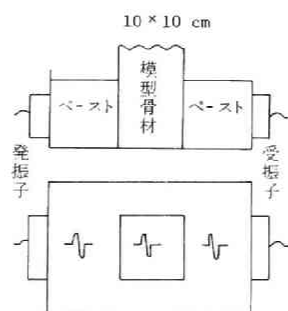


図-4.22 ペーストの音速を実測してWyllie式を適用した場合の計測値と実測値の比較



れた場合の速度変化を測定したが図のように実測値と計算値がかなり一致することが解った。
 Nwokoye⁴¹⁾ はコンクリートを三相体と考え、粗骨材、細骨材、ペーストの伝播速度を V_a, V_s, V_p として

$$1/V_t = \alpha/V_a + \beta/V_s + [1 + (\alpha - \beta)]/V_p \quad (4 \cdot 14)$$

なる式によって配合と伝播速度の関係を示しており、コンクリートの伝播速度式として複合材料の直列式が適用できる。また骨材の容積率を ϕ_a 、密度を ρ_a 、体積弾性率を K_a として (4・10) 式をコンクリート式として発展させると次式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} \rho &= \rho_a \phi_a + \rho_b \phi_b + \rho_c \phi_c + \rho_w \phi_w \\ \frac{1}{K} &= \frac{\phi_a}{K_a} + \frac{\phi_b}{K_b} + \frac{\phi_c}{K_c} + \frac{\phi_w}{K_w} \end{aligned} \right\} \quad (4 \cdot 15)$$

$$V = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$$

このように体積弾性率から縦波伝播速度を求める式としては、硬化コンクリートについては Reynolds⁴²⁾ らの式がある。

$$V_e = \sqrt{\frac{K^* + \frac{4}{3} G^*}{\rho}} \quad (4 \cdot 16)$$

ここで K^*, G^* はそれぞれ複合体の体積弾性率、せん断弾性率であり ρ は複合体の密度である。この式は理論的にはフレッシュコンクリートの縦波速度式への応用は可能である。例えば (4・15) 式により K^* が求まり、 G^* は横波速度 V_s が測定できれば

$$V_s = \sqrt{\frac{G^*}{\rho}} \quad (4 \cdot 17)$$

より求まるのであるが、練り混ぜ直後において粒子が完全に分散しておれば G^* は 0 となるので (4・15) 式と同等の式となる。しかし、固体粒子が沈降や吸着によって網目構造や濃度が濃い場合には固体粒子の充填状態を造るのでいずれ横波は伝播することになり (4・16) 式の適用は可能となる。固体粒子が沈降して充填状態を形成している状況は固体と液体からなる 2 相問題であり多孔質弾性体の理論と呼ばれるものである。^{43) 44)} この多孔質弾性体の波動理論への応用は石原^{45) 46)} によって行われた。この石原の多孔質弾性体の波動理論について、コンクリートの波動式への適用を試みてみる。フレッシュコンクリートが図 4・23 (c) の状態にあると仮定し、固体粒子が骨

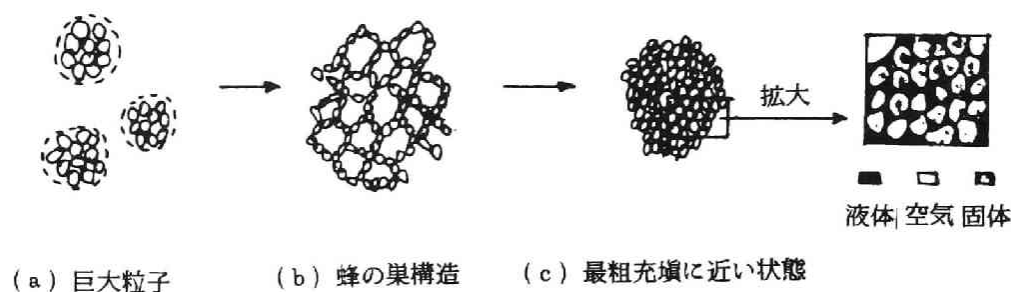


図-4.23 粒子濃度による凝集状態の違い

格構造部分，水が間隙を充している状態を想定し，骨格や間隙水の応力ひずみの関係は線型と仮定する。また粒子骨格と間隙水はランダムな分布をしているが連続体としてみなし体積ひずみはみかけの量を定義する。図4・24 (a) のコンクリートに外から応力がかかったとすると骨格部

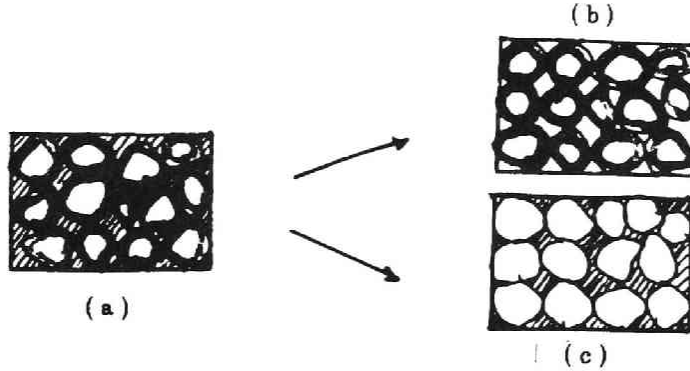


図-4.24 多孔質弾性体 [(a) コンクリート (b) 骨格部分 (c) 間隙液体部分]

分(図4・24 (b)) および間隙水の部分(図4・24 (c))のみかけの体積ひずみ e_b , e_a は次式になる。

$$\left. \begin{aligned} e_b &= (1-n)e_s + ne_p \\ e_a &= (1-n)(e_s - e_p) + e_w \end{aligned} \right\} \quad (4 \cdot 18)$$

ここで n は間隙率， e_s , e_w , e_p はそれぞれ固体粒子，水，間隙の体積ひずみである。水-固体粒子の混合体に生ずる変形は外力によって生ずるが，この応力には粒子間応力(有効応力) σ_e と間隙水圧 u がある。骨格に作用する全応力を σ ，間隙水部分の応力を p とすると次式がえられる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \sigma_e - (1-n)u \\ p &= nu \end{aligned} \right\} \quad (4 \cdot 19)$$

各々の構成部分についての応力ひずみ関係は(4・18)の体積ひずみを用いて一般に次のように書くことができる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \alpha_b e_b + \alpha_c e_a \\ -p &= \alpha_c e_b + k_c e_a \end{aligned} \right\} \quad (4 \cdot 20)$$

ここで α_b , α_c , k_c は定数である。

骨格構造の見かけの変位を u_x , u_y , u_z ，間隙水の部分のみかけ変位を v_x , v_y , v_z とすると，体積ひずみ e_b , e_a は

$$\left. \begin{aligned} e_b &= \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \\ e_a &= \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \end{aligned} \right\} \quad (4 \cdot 21)$$

である。また骨格部分に作用する応力の垂直成分を σ_x , σ_y , σ_z ，せん断応力を τ_{xy} , τ_{yz} , τ_{zx} とすると骨格に作用する全応力 σ は

$$\sigma = \frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \quad (4 \cdot 22)$$

となり骨格部分のせん断変形に対する応力ひずみの関係は次式で表わせる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \sigma + 2\mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} - \frac{1}{3} e_b \right) \\ \sigma_y &= \sigma + 2\mu \left(\frac{\partial u_y}{\partial x} - \frac{1}{3} e_b \right) \\ \sigma_z &= \sigma + 2\mu \left(\frac{\partial u_z}{\partial x} - \frac{1}{3} e_b \right) \end{aligned} \right\} \quad (4 \cdot 23)$$

$$\left. \begin{aligned} \tau_{xy} &= \mu \left(\frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y} \right) \\ \tau_{yz} &= \mu \left(\frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial z} \right) \\ \tau_{zx} &= \mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) \end{aligned} \right\} \quad (4 \cdot 24)$$

ここで μ は骨格構造のせん断弾性係数である。(4・20)を(4・23)に代入すると

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= (\alpha_b - \frac{2}{3} \mu) e_b + \alpha_c e_a + 2\mu \frac{\partial u_x}{\partial x} \\ \sigma_y &= (\alpha_b - \frac{2}{3} \mu) e_b + \alpha_c e_a + 2\mu \frac{\partial u_y}{\partial y} \\ \sigma_z &= (\alpha_b - \frac{2}{3} \mu) e_b + \alpha_c e_a + 2\mu \frac{\partial u_z}{\partial z} \end{aligned} \right\} \quad (4 \cdot 25)$$

となる。(4・23)(4・24)は多孔質弾性体の一般式である。

さらに(4・18), (4・19)式を用いて(4・20)式を書き直してみる。

$$\left. \begin{aligned} n e_p + (1-n) e_s &= \frac{1}{\alpha_b k_c - \alpha_c^2} [k_c \sigma_e + \{(n-1)k_c + n\alpha_c\}u] \\ (1-n)(e_s - e_p) + e_w &= \frac{1}{\alpha_b k_c - \alpha_c^2} [\alpha_c \sigma_e + \{(n-1)\alpha_c + n\alpha_b\}u] \end{aligned} \right\} \quad (4 \cdot 26)$$

ここでコンクリートは非排水状態で試験されることになるので、体積変形が起った場合骨格構造への水の出入がないと考えると、間隙水の体積ひずみが間隙の体積ひずみの変化に等しいということになるので

$$e_p = e_w \quad (4 \cdot 27)$$

となるからこれを(4・18)式に代入すると

$$e_b = e_a \quad (4 \cdot 28)$$

になるからこれを(4・20)式に代入して整理すると

$$\left. \begin{aligned} e_b &= B_u (\sigma - P) \\ B_u &= \frac{1}{\alpha_b + 2\alpha_c + k_c} \end{aligned} \right\} \quad (4 \cdot 29)$$

となり B_u を非排水圧縮率と呼ぶ。ところで排水状態で試験を行えば間隙水圧はゼロになり試料中の水は体積変化を起さないで (4・26) の e_w, u は 0 となるので (4・26) 式の上式にこれを代入してやると

$$\left. \begin{aligned} ne_p + (1-n)e_s &= B_b \sigma_e \\ B_b &= \frac{k_c}{\alpha_b k_c - \alpha_c^2} \end{aligned} \right\} \quad (4 \cdot 30)$$

となり, (4・18) 式より

$$e_b = B_b \sigma_e \quad (4 \cdot 31)$$

となる。ここで B_b のことを骨格圧縮率と呼ぶ。次に (4・26) の下式に $u=0, e_w=0$ の条件を代入すると

$$(1-n)(e_s - e_p) = \frac{\alpha_c}{\alpha_b k_c - \alpha_c^2} \sigma_e \quad (4 \cdot 32)$$

となる。これを整理して (4・30) との差をとると

$$e_b = \frac{\alpha_c + k_c}{\alpha_b k_c - \alpha_c^2} \sigma_e = B_p \sigma_e \quad (4 \cdot 33)$$

となり, ここで B_p のことを間隙圧縮率と呼ぶ。次に飽和した試料に水圧 U をかけるとき, 固体粒子が e_s だけ圧縮したとする。骨格構造も間隙も同じ割合で減少するので

$$e_b = e_p = e_s \quad (4 \cdot 34)$$

となるから, これを (4・26) 式に代入すると

$$\begin{aligned} e_p &= e_s = B_s u \\ e_w &= B_l u \end{aligned} \quad (4 \cdot 35)$$

ここで B_s, B_l はそれぞれ

$$\left. \begin{aligned} B_s &= -\frac{(n-1)k_c + n\alpha_c}{\alpha_b k_c - \alpha_c^2} \\ B_l &= \frac{(n-1)\alpha_c + n\alpha_b}{\alpha_b k_c - \alpha_c^2} \end{aligned} \right\} \quad (4 \cdot 36)$$

で求まる。ここに B_s は固体粒子の圧縮率, B_l は水の圧縮率である。以上 (4・30) 式から (4・36) 式までを使って, α_b, α_c, k_c を求めてやると次式になる。

$$\left. \begin{aligned} \alpha_b &= \frac{(n-1)^2 B_p + (n-1) B_s + B_l}{B_b (B_l - B_s) + B_p B_s} \\ \alpha_c &= \frac{-n[(n-1) B_p + B_s]}{B_b (B_l - B_s) + B_p B_s} \end{aligned} \right\} \quad (4 \cdot 37)$$

$$k_c = \frac{n B_b}{B_b (B_l - B_s) - B_p B_s}$$

この式を使って (4・29) 式の B_u を求めてやると

$$B_u = \frac{B_b (B_l - B_s) + B_p B_s}{B_p - B_s + B_l} \quad (4 \cdot 38)$$

となる。従ってコンクリートの非排水状態における圧縮率は骨格圧縮率，固体粒子の圧縮率，水の圧縮率 ($48 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{kg}$) と間隙率によって求めることができる。表 4・6 は Skempton⁴⁷⁾ によって求められた

表-4.6 各種材料の圧縮率 (Skemptonによる)⁴⁷⁾

材 料	骨格圧縮率 B_b ($\times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{kg}$)	固体粒子圧縮率 B_s ($\times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{kg}$)	B_s/B_b
砂 岩	5.8	2.7	0.46
花こう岩	7.5	1.9	0.25
大理石	17.5	1.4	0.08
コンクリート	20.0	2.5	0.12
密な砂	1800	2.7	0.0015
緩い砂	9000	2.7	0.0003
過圧密粘土	7500	2.0	0.00025
正規圧密粘土	6000	2.0	0.0003

水の圧縮率 $B_l = 48 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{kg}$

各種材料の圧縮率であるがこの値を使って非排水圧縮率 B_u を求めればよい。次に骨格構造部分および間隙水部分の運動方程式を別々にたててみると

$$\left. \begin{aligned} \rho_s \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} &= \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + b \frac{\partial}{\partial t} (u_x - v_x) \\ \rho_s \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} &= \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + b \frac{\partial}{\partial t} (u_y - v_y) \\ \rho_s \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} &= \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + b \frac{\partial}{\partial t} (u_z - v_z) \end{aligned} \right\} \quad (4 \cdot 39)$$

$$\left. \begin{aligned} \rho_w \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} &= -\frac{\partial p}{\partial x} - b \frac{\partial}{\partial t} (u_x - v_x) \\ \rho_w \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} &= -\frac{\partial p}{\partial y} - b \frac{\partial}{\partial t} (u_y - v_y) \\ \rho_w \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} &= -\frac{\partial p}{\partial z} - b \frac{\partial}{\partial t} (u_z - v_z) \end{aligned} \right\} \quad (4 \cdot 40)$$

ここで ρ_s, ρ_w は骨格構造部分および間隙水部分のみかけの単位体積質量である。(4・38)(4・39) 式に(4・20)(4・23)(4・24)を代入すると

$$\left. \begin{aligned} \rho_s \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} &= \mu \nabla^2 u_x + \left(\alpha_b + \frac{\mu}{3} \right) \frac{\partial e_b}{\partial x} + \alpha_c \frac{\partial e_a}{\partial x} + b \frac{\partial}{\partial t} (u_x - v_x) \\ \rho_s \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} &= \mu \nabla^2 u_y + \left(\alpha_b + \frac{\mu}{3} \right) \frac{\partial e_b}{\partial y} + \alpha_c \frac{\partial e_a}{\partial y} + b \frac{\partial}{\partial t} (u_y - v_y) \\ \rho_s \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} &= \mu \nabla^2 u_z + \left(\alpha_b + \frac{\mu}{3} \right) \frac{\partial e_b}{\partial z} + \alpha_c \frac{\partial e_a}{\partial z} + b \frac{\partial}{\partial t} (u_z - v_z) \end{aligned} \right\} \quad (4 \cdot 41)$$

ここで $\nabla^2 = \partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial y^2 + \partial^2 / \partial z^2$ である。

$$\left. \begin{aligned} \rho_w \frac{\partial^2 v_x}{\partial t^2} &= \alpha_c \frac{\partial e_b}{\partial x} + k_c \frac{\partial e_a}{\partial x} - b \frac{\partial}{\partial t} (u_x - v_x) \\ \rho_w \frac{\partial^2 v_y}{\partial t^2} &= \alpha_c \frac{\partial e_b}{\partial y} + k_c \frac{\partial e_a}{\partial y} - b \frac{\partial}{\partial t} (u_y - v_y) \\ \rho_w \frac{\partial^2 v_z}{\partial t^2} &= \alpha_c \frac{\partial e_b}{\partial z} + k_c \frac{\partial e_a}{\partial z} - b \frac{\partial}{\partial t} (u_z - v_z) \end{aligned} \right\} \quad (4 \cdot 42)$$

上式中の b は(4・39)の慣性項を無視して変形した式とTerzaghiの圧密式との比較から得られる。

$$b = \frac{n \rho_w g}{k} \quad (4 \cdot 43)$$

式中の g は重力の加速度, k は透水係数である。フレッシュコンクリートの透水係数はどの程度の値になるかは不明であるが、表4・7⁴⁸⁾に示すように透水性良好な砂で $1 \sim 10^{-3} \text{ cm/sec}$, 粘土

表-4.7 土の透水係数 (當山による)⁴⁸⁾

土 質	c m / s	m / d a y	備 考
砂 利	1 0 ~ 1	8 6 0 0 ~ 8 6 0	排水良好
砂	1 ~ 1 0 ⁻³	8 6 0 ~ 0 . 8 6	〃
シルト	1 0 ⁻³ ~ 1 0 ⁻⁶	0 . 8 6 ~ 0 . 8 6 × 1 0 ⁻³	排水不良
粘 土	1 0 ⁻⁶ 以下	0 . 8 6 × 1 0 ⁻³ 以下	不透水

で 10^{-6} cm/sec 以下であるから, $u \approx v$ となるようなゆっくりとした, 即ち慣性項が無視できるような振動では右辺第4項の b が非常に大きな値となり単に圧密の問題になる。コンクリートの振動締め固めにおいてはこの項が重要になってくる。したがって(4・42)(4・43)が波動方程式として存在するには

$$u_x = v_x, \quad u_y = v_y, \quad u_z = v_z \quad (4 \cdot 44)$$

なる条件が消されるときであり、(4・21)式において $e_b = e_a$ の場合であるから (4・28) の非排水条件を満たす場合である。(4・44)の条件を(4・41)(4・42)に代入し整理すると

$$\left. \begin{aligned} \rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} &= \mu p^2 u_x + (\alpha_b + 2\alpha_c + k_c + \frac{1}{3}\mu) \frac{\partial e_b}{\partial x} \\ \rho \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} &= \mu p^2 u_y + (\alpha_b + 2\alpha_c + k_c + \frac{1}{3}\mu) \frac{\partial e_b}{\partial y} \\ \rho \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} &= \mu p^2 u_z + (\alpha_b + 2\alpha_c + k_c + \frac{1}{3}\mu) \frac{\partial e_b}{\partial z} \end{aligned} \right\} \quad (4 \cdot 45)$$

が得られる。ただし ρ は固体粒子と水の混合物の単位体積質量である。

ここで2次元の平面ひずみのみを考えると(4・45)式は

$$\frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} = \left(\frac{\alpha_b + 2\alpha_c + k_c + 4/3\mu}{\rho} \right) \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} = V_l^2 \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} \quad (4 \cdot 46)$$

$$\frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} = \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} = V_s^2 \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} \quad (4 \cdot 47)$$

となる。ここで V_e , V_l は縦波伝播速度および横波伝播速度である。

$$V_l^2 = \frac{\alpha_b + 2\alpha_c + k_c + 4/3\mu}{\rho} \quad (4 \cdot 48)$$

$$V_s^2 = \frac{\mu}{\rho} \quad (4 \cdot 49) \text{ と}$$

なり横波は普通の弾性波速度と同じであるが多孔質弾性体の場合の特徴が縦波に表われている。即ち、体積弾性率の $(\alpha_b + 2\alpha_c + k_c)$ の部分に特徴が表われている。ここで(4・48)式に(4・29)(4・38)を代入し、 $B_l/B_b \doteq 0$, $B_s/B_b \doteq 0$ として整理すると

$$\left(\frac{V_e}{V_f} \right)^2 = \left[\frac{1}{B_s + n(B_l - B_s)} + \frac{4}{3} \mu \right] \frac{B_l}{n + (1-n)G_s} \quad (4 \cdot 50)$$

ここで V_f は水中における圧縮波の伝播速度、 G_s は固体粒子の比重である。

$$V_f^2 = \frac{n}{B_l \rho_w} \quad (4 \cdot 51)$$

(4・50)式をセメントペーストについて適用してみる。セメント粒子の比重 $G_s = 3.15$ せん断弾性係数 $\mu = 50 \text{ kg/cm}^2$, $B_l = 48 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{kg}$, $B_s = 2.0 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{kg}$ として間隙率 n に対する (V_e/V_f) の変化を計算してプロットしたものが図4・25である図中では $G_s = 2.50$ のもの

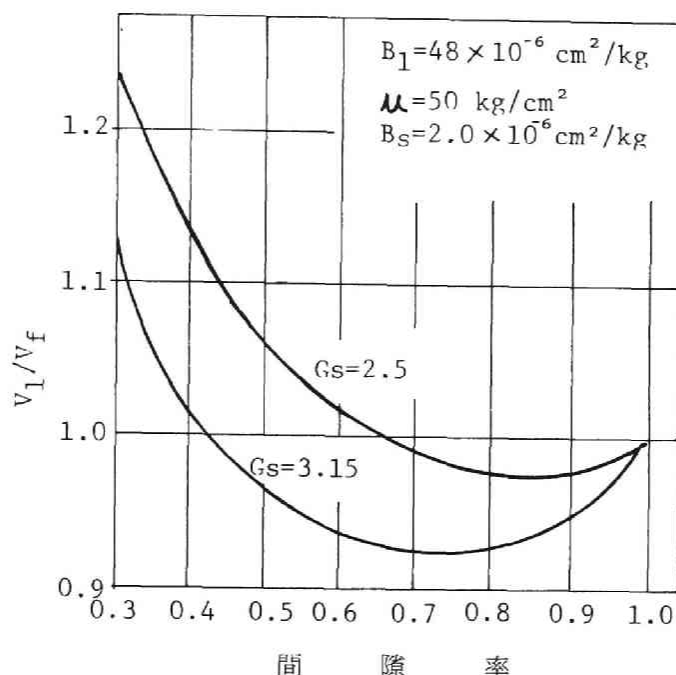


図-4.25 多孔質弾性体の弾性波速度
(石原による)⁴⁶⁾

についても計算してある。図においてペーストやモルタル、コンクリートが沈降して骨格を形成し多孔質弾性体と考えられる状態になった時期から縦波の速度は間隙率が低下するに従って急速に増加することになり図4・25のような曲線を示しながら速度増加するのであろう。また練り混ぜ直後から数時間における速度増加が鈍いのは分散状態にある固体粒子が吸着し徐々に凝集して巨大粒子を形成し、みかけの濃度を漸増することから速度は増加するものと分散式が適用できる範囲にあるから、なお気泡の影響が支配的になっているためであろう。以上によりコンクリートの縦波伝播速度式としては、練り混ぜ直後においては(4・15)が簡単であり実用的にはペーストの音速を実測することにより(4・13)ないしは(4・14)から求まる。また粒子が沈降して骨格構造が形成された以後は石原の式(4・48)が適用できる。

4・2・5 まとめ

コンクリートの配合と縦波伝播速度に関する実験結果についてまとめると以下の結論を得た。

- (1) コンクリートの練り混ぜ直後における縦波伝播速度は配合のいかんにかかわらず100m/sec前後となる。
- (2) 練り混ぜ直後における縦波伝播速度は、分散系の速度式からも説明されるように、空気量によって著しく影響されるため、伝播速度から配合要因を判定することは実質的に不可能である。
- (3) 練り混ぜから数時間たてば配合の違いが縦波伝播速度の差となって表われてくる。即ち、スランプと伝播速度、水セメント比と伝播速度、空気量と伝播速度、骨材量と伝播速度、セメントの

種類と伝播速度の間に有意な差が生じてくる。

(4) コンクリートの縦波伝播速度式としては、練り混ぜ直後においては分散系の速度式が適用でき、数時間後からは多孔質弾性体の波動理論式の適用が可能である。

4・3 縦波伝播特性のレオロジー的評価

4・3・1 はじめに

4・2 節において、フレッシュコンクリートのワーカビリティやコンシステンシーあるいはプラスチックという物性の尺度を縦波の伝播速度に求めたが、水セメント比の差が初期速度に影響しないということが判明したので、本節においてはフレッシュコンクリートを縦振動させた場合の動的な挙動からレオロジー的解析をおこない、上述の諸物性の指標になり得ると考えられる動的弾性率、動的粘性率、を測定し、フレッシュコンクリートの諸性質との関連性について考察を加えた。

4・3・2 粘弾性体中を伝播する縦波の挙動

音波パルスによる粘弾性の測定は硬化コンクリートのもつ粘弾性的特性を調べるのに用いられるが、低い周波数におけるフレッシュコンクリートのレオロジー量の測定にも適用できる。練り混ぜてから硬化して行く過程を、攪拌など試料を乱すことなく静置した状態で適用できるという意味で音波の伝播特性すなわち、音速と減衰を測定する方法が適していると思われる。

粘弾性体中を伝播する複素音速 C^* は複素弾性率 M^* 、密度 ρ の間に

$$C^{*2} = M^*/\rho \quad (4 \cdot 51)$$

なる関係がある。

$$M^* = M' + i M'' \quad (4 \cdot 52)$$

として実数部、虚数部に分けると

$$\left. \begin{aligned} M' &= \frac{\omega^2 \lambda \rho [4\pi^2 - (\alpha\lambda)^2]}{[4\pi^2 + (\alpha\lambda)^2]^2} \\ M'' &= \frac{4\pi\omega\lambda^2 \rho (\alpha\lambda)}{[4\pi^2 + (\alpha\lambda)^2]^2} \end{aligned} \right\} \quad (4 \cdot 53)$$

が求まる。ここで α は減衰係数、 λ は波長、 $\omega = 2\pi f$ 、 f は周波数である。無限媒体中の縦波においては

$$M^* = K^* + \frac{4}{3} G^* \quad (4 \cdot 54)$$

となり M^* は縦波弾性率と呼ばれ、横波については

$$M^* = G^* \quad (4 \cdot 55)$$

となり M^* は横波弾性率と呼ばれる。ところで問題としている練り混ぜ直後におけるコンクリートでは縦波速度 V_l 、横波速度 V_s を実測して次式により K^* 、 G^* を求めればよい。

$$V_e = \sqrt{\frac{K^* + \frac{4}{3} G^*}{\rho}} \quad (4 \cdot 56)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{G^*}{\rho}}$$

しかし、実際は前節において述べたように練混ぜ直後のコンクリートは横波が波として試料中を伝播しにくいというところがあるので基本的には縦波により測定することにした。(4・53)式の縦波弾性率の実数部と虚数部をそれぞれ動的弾性率 E' 、動的粘性率 η' と置き換えて解析することとした。

$$E' = \rho V_l^2 \frac{1-r^2}{[1+r^2]^2}$$

$$\eta' = \rho V_l^2 \frac{2r}{[1+r^2]^2}$$

$$r = \alpha V_l / \omega_l \quad (4 \cdot 57)$$

$$\omega_l = 2\pi f_l$$

ここで f_l は縦波の透過周波数である。

4・3・3 減衰係数

コンクリートの減衰係数を求めた例は材料の組成的な複雑さ、測定の困難さから数少ない⁵⁴⁾。測定方法には透過法と多重反射法(図4・26)がある。更に透過法には、差による方法(図4・27)と水浸換法がある。(図4・28)。

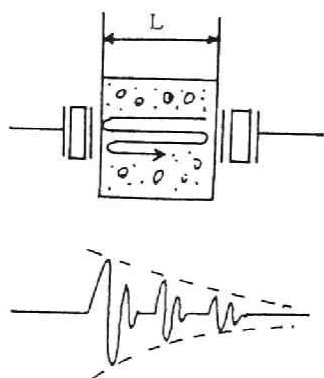


図-4.26 多重反射法

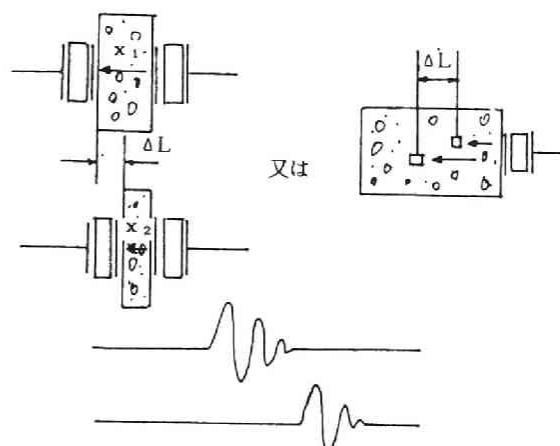


図-4.27 差による方法

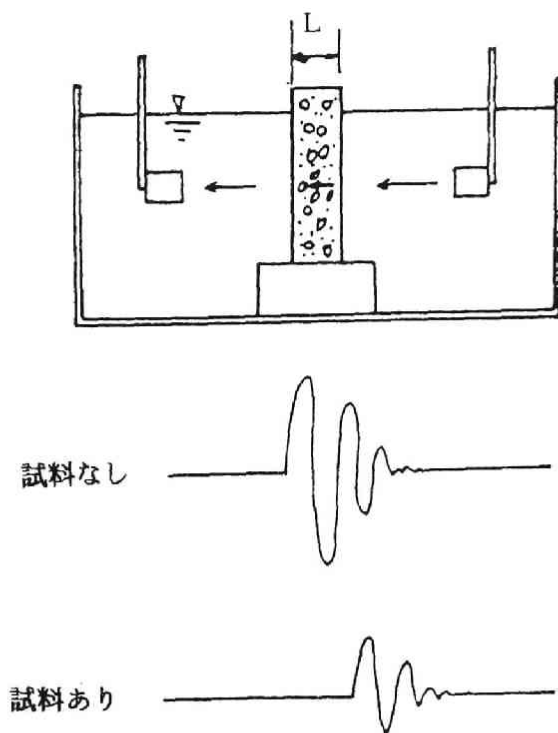


図-4.28 水浸置換法

まず差による方法について説明する。超音波パルスが媒体中を伝播するとき、その音圧の変化は指数的に減衰する。パルスの発振源から距離 x 離れた位置の音圧は

$$I = I_0 e^{-\alpha x} e^{i\omega(t-x/c)} \quad (4 \cdot 58)$$

ここに I_0 は $x=0$ における音圧である。

近似的には $i\omega(t-x/c)$ を無視することができるので (4・58) 式は

$$I = I_0 e^{-\alpha x} \quad (4 \cdot 59)$$

と置くことができる。いま図 4・27 における距離 x_1 , x_2 における音圧を I_1 , I_2 とすると

$$I_1 = I_0 e^{-\alpha x_1} \quad (4 \cdot 60)$$

$$I_2 = I_0 e^{-\alpha x_2}$$

なり上式を整理してやると

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{\log_e I_1 - \log_e I_2}{x_2 - x_1} \\ &= \frac{\log_e (I_1/I_2)}{\Delta x} \div \frac{2.30 \log_{10} (I_1/I_2)}{\Delta x} \end{aligned} \quad (4 \cdot 61)$$

となる。

多重反射法は図4・26に表わされるように音波パルスが試料内を往復の繰返しをすることにより受振波形は減衰して行く。音波パルスの第1波の音圧を I_1 、第2波の音圧を I_2 とすると I_1 から I_2 までの伝播距離は発振振子間距離 x の2倍ということになるから(4・16)式の Δx が $2x$ となるだけである。

$$\alpha = \frac{\log_e(I_1/I_2)}{2x} \quad (4 \cdot 62)$$

次に水浸置換法は水中に浸けた発振子と受振子の間に試料がある場合と無い場合の音圧によって求めるもので減衰係数は一般に次式により求まる。⁵⁷⁾

$$\alpha = \frac{20}{\Delta l} \left(\log_{10} \frac{P'_1}{P_0} - \log \frac{P_1}{P_0} \right) \quad (4 \cdot 63)$$

ここで

$$\frac{P'_1}{P_0} = \frac{4Z_c Z_w}{(Z_c + Z_w)^2} \quad (4 \cdot 64)$$

$$Z_c = \rho_c \cdot C_c, \quad Z_w = \rho_w C_w \quad (4 \cdot 65)$$

Δl は試料の幅、 P_0 は水の場合の音圧、 P_1 はコンクリートを水中に入れた場合の音圧、 Z_c はコンクリートの音響インピーダンス、 ρ_c はコンクリートの密度、 C_c はコンクリートの音速、 Z_w は水の音響インピーダンス、 ρ_w は水の密度、 C_w は水の音速である。各方法のどれをフレッシュコンクリート用として選んでも良いが差による方法は型枠を2つ用意するか、コンクリート中にピックアップを2つ埋設するかいずれにせよ透過経路において違う試料中を透過するので試料の均質性が要求されるし、多重反射法では第1波と第2波の間に型枠側面や底面からの反射波の影響が入る可能性がある所以この点について考慮しておく必要がある。また水浸置換法ではフレッシュコンクリートを直接水に浸けることは出来ない所以型枠に入れるなど何らかの策を講じる必要がある。以上の点を考慮して適当な方法を選べば良い。

4・3・4 実験方法

(1) 実験装置

音波パルスにより(4・57)式の E' や η' を測定する場合音波が平面波である必要がある。実験において振動子と受振子の距離をあまり近づけると近距離音場の問題があるし、遠すぎるとコンクリートがフレッシュな段階においては減衰が大きく受振できなくなる。図4・29は塩化カルシウムをセメント重量の1%添加した水セメント比30%のペーストの縦波速度と受振波形の周波数を3時間まで測定した結果である。ただし測定距離を4.8cmにとり、半径5cmの円板チタン酸バリウム系振動子を使用し、図4・30で示す装置を用いている。このように硬化を促進させた場合の透過周波数は880Hz～54kHzであり、超音波探傷で問題となる近距離音場はMHzの領域であるので特に問題はない。本研究の目的としている極く初期の材齢の間は4cm～10cm以上あればよいと考えて実験を行った。音圧の減衰の測定は2個の受振子を音波の伝播距離を変えて試料中に埋め込む方法と多重反射法により行った。なお、型枠は前節で述べたようにすべて木

製型枠を使用し，発振子，受振子は発泡スチロール又はスポンジゴムで固定している。測定項目は（4・57）式において透過周波数，伝播速度，減衰係数であるが，これらはオシロスコープのブラウン管上で直接，パルスの周期，伝播時間，音圧を読み取るか又は写真撮影によって読み取り後ほど計算される。多重反射法，差による方法の受振波形を写真4・3，4・4に示す。

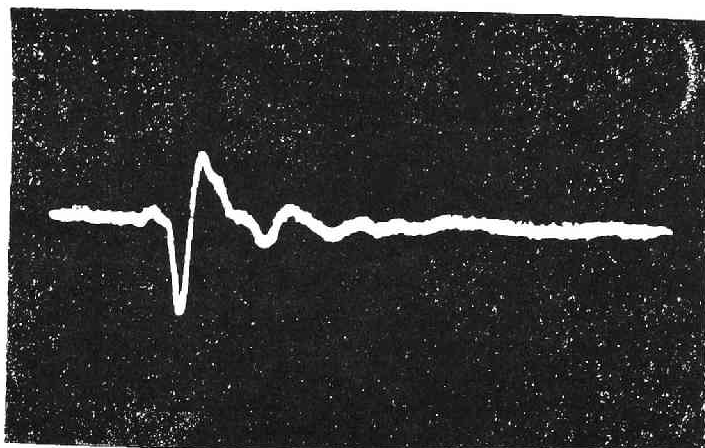


写真-4.3 多重反射法受振波形

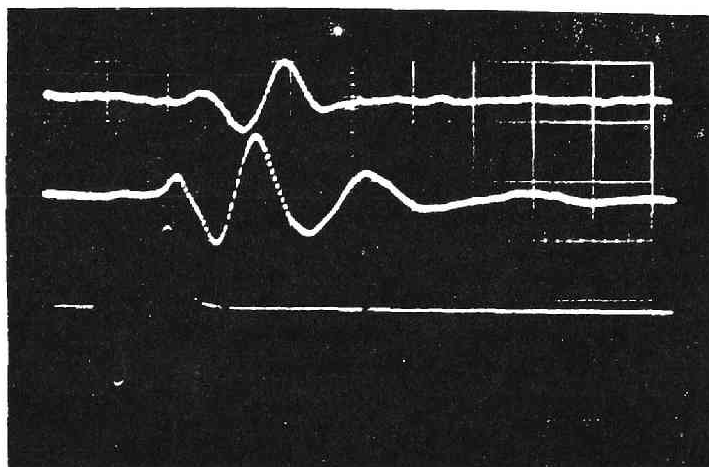


写真-4.4 差による方法受振波形

（2）使用材料および配合

セメントは普通ポルトランドセメント（日本社製），細骨材はモルタル実験の場合豊浦標準砂，コンクリート実験の場合比重2.63の川砂，粗骨材は比重2.68の碎石を5～10mmにふるい分けて使用した。配合はペースト実験の場合で水セメント比を30，40，50％の3種類とし，モルタル実験の場合水セメント比を50％と一定して，砂セメント比を1.5と2.0について行った。コンクリートはセメント：細骨材：粗骨材の比を1：1：1，1：1：2，1：1：3，1：2：3とし水セメント比は50％と一定にとった。

4・3・5 実験結果および考察

(1) ベーストの濃度とレオロジー定数

水セメント比を30%から50%まで変化させペーストの濃度を薄くして行った場合の動的レオロジー定数への影響を調べた。結果を図4・31に示す。縦波速度はセメントペーストの濃度がこの

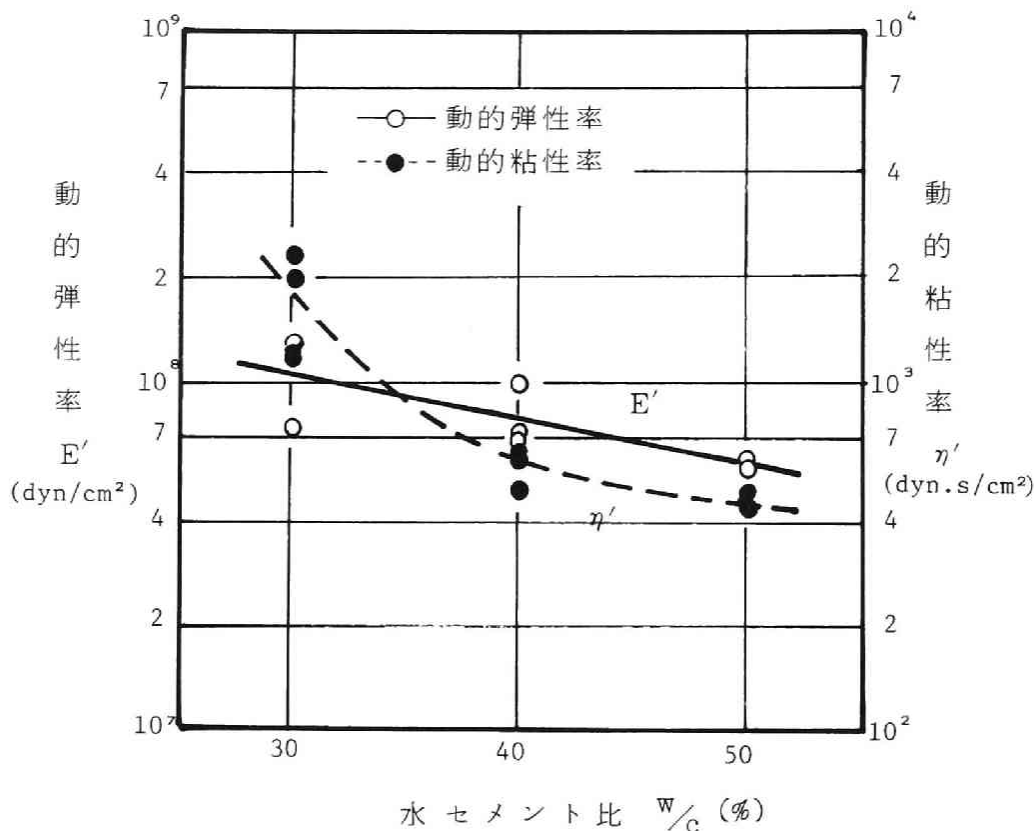


図-4.31 ベーストのレオロジー定数に及ぼす
水セメント比の影響

範囲内ではほとんど差が生じなかったが、ペーストを粘弾性体とした場合の動的弾性率 E' 、動的粘性率 η' にはその差が明瞭に出てくる。図の左側の縦軸は動的弾性率 E' の対数を横軸は水セメント比を取っており右側の縦軸は動的粘性率 η' の対数を取っている。水セメント比が30%から50%の範囲のペーストの動的弾性率 E' は水セメント比との間に指数関係があり実験式として次式が得られた。

$$E'_p = 2.5 \times 10^8 e^{-2.886(W/C)} \quad (\text{dyn/cm}^2) \quad (4 \cdot 66)$$

ペーストの動的粘性率 η' と水セメント比の間にはべき関係の関係があり実験式を求めると次式が得られた。

$$\eta'_p = 61.5 (W/C)^{-2.73} \quad (\text{dyn} \cdot \text{sec/cm}^2) \quad (4 \cdot 67)$$

以上によりペーストの動的レオロジー定数はペースト濃度によって急激な変化をすることがわかった。

(2) モルタルの配合とレオロジー定数

モルタル中の水セメント比を50%と一定して細骨材の量を変化させた場合のレオロジー定数の変化を調べてみた。実験結果を図4・32に示す。図中の左の縦軸は動的弾性率 E' ，右の縦軸は

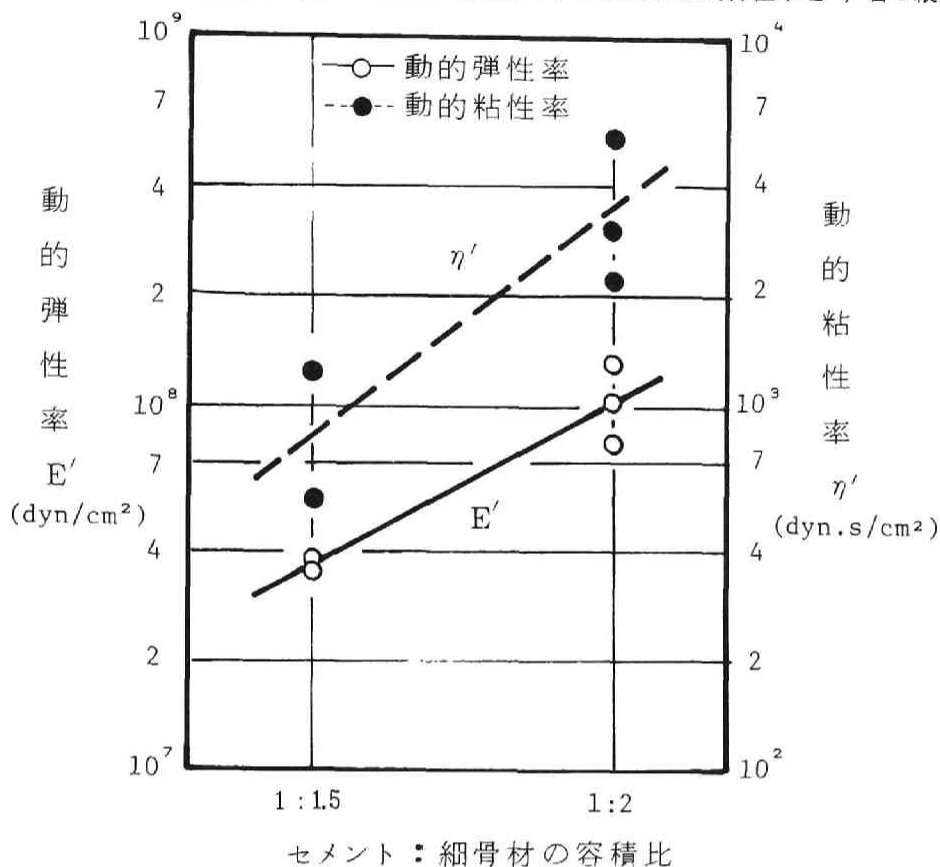


図-1.32 モルタルのレオロジー定数に及ぼす

セメント砂比の影響 ($W/C = 50\%$)

動的粘性率 η' を取りモルタルの骨材量はセメント重量に対して1.5, 2.0の2種類について行っている。図から明らかなようにモルタル中の砂の量の増加は動的弾性率 E' と動的粘性率 η' の増加を導びくことがわかる。これはペースト中にある程度の砂粒子が混入しても混入量が少ない間は砂粒子間の平均液膜距離は離れているのでレオロジー定数には影響せず、むしろペーストとレオロジー定数に支配されるが、1:2モルタルの様に骨材の占める容積が大きくなると急激に粘度が増加すると砂粒子の接触による骨格構造の形成などから硬さを増すことが原因と考えられる。図4・33⁵⁸⁾は著者らが行ったモルタルの相対粘度と砂の体積濃度の関係について行った実験結果であるが砂の体積濃度が最高容積濃度（この場合 $Co=0.52$ ）に近づくにつれて急激な増加をすることがわかる。ちなみに1:1.5モルタル、1:2モルタルの砂粒子体積濃度はそれぞれ0.41と0.48であることからこの原因が推察できる。

(3) コンクリートの配合とレオロジー定数

ペースト及びモルタルの実験によってペーストの濃度が濃くなればレオロジー定数は増加し、

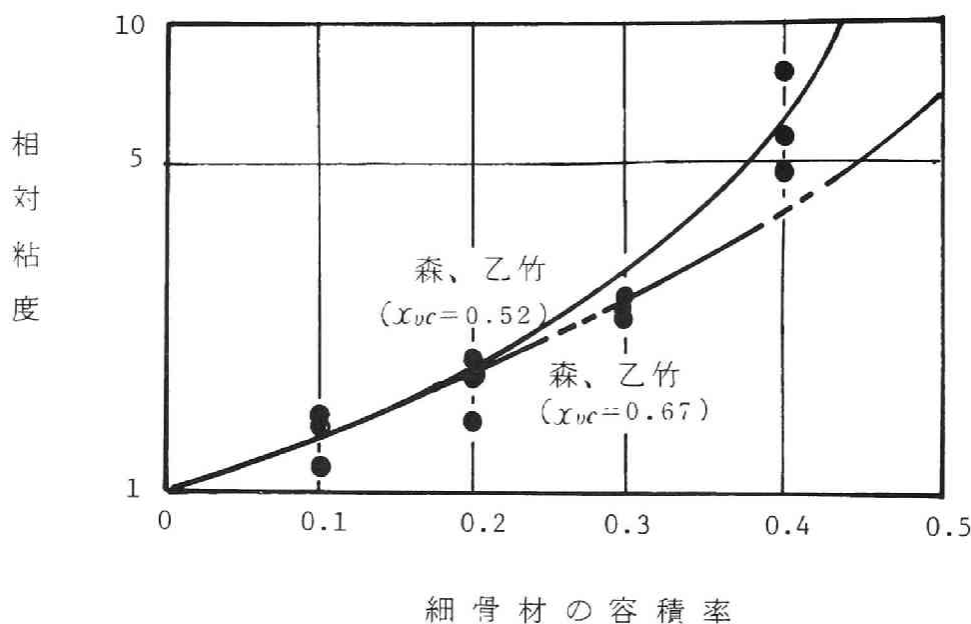


図-4.33 モルタル中の細骨材の容積率が相対粘度に及ぼす影響
($W/c=55\%$)⁵⁸⁾

モルタルについては砂の混入によってレオロジー定数は増加することが明らかとなった。従って、言換えれば固体分量の増加がレオロジー定数を増加させると考えて良いであろう。コンクリートについてペーストの濃度を一定として、又コンクリート中のモルタル分の性質を一定とした場合の粗骨材の占める容積率を増加させて行くとレオロジー定数にどのような影響を及ぼすかを調べた結果が図4・34である。また表4・8には空気以外の材料の容積率が示してある。図は水セメ

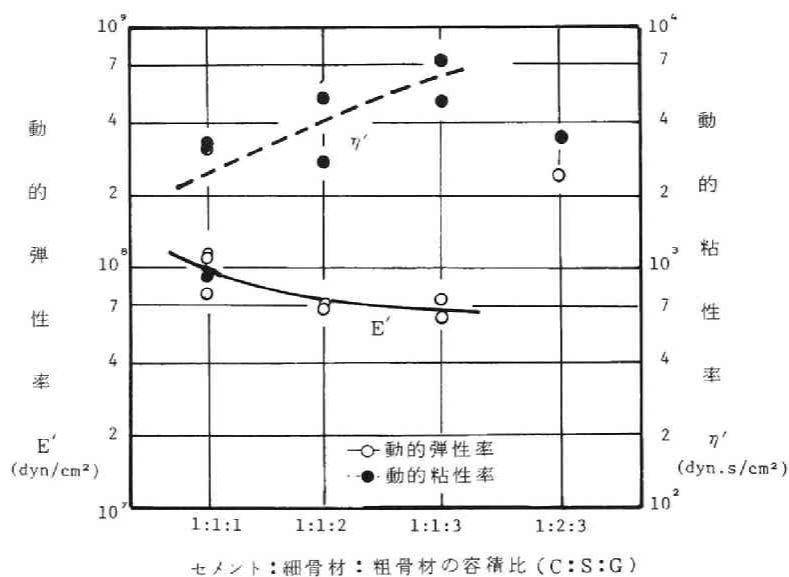


図-4.34 コンクリートのレオロジー定数と細・骨材の
混合比率との関係 ($W/c=50\%$)

ント比を一般の配合に用いられる50%に取って、モルタルはセメント細骨材重量比で1 : 1とした場合の粗骨材の重量を細骨材の重量の1倍、2倍、3倍の割合で混入させている。動的弾性率 E' は粗骨材量の増加によって幾分低下する傾向を示しているが余り大きな変化はない。しかし動的粘性率 η' は増加する傾向を示している。これは表4・8のペーストの容積率 ϕ_p あるいはモルタルの容積率 ϕ_m が示すようにコンクリートを懸濁液と考えた場合の分散媒の減少を意味しており骨材粒子間の平均液膜距離の接近による粘度増加を発生させたものと考えられる。図中にはコンクリート中のモルタル部分のセメント細骨材比を1 : 2にした場合についての実験結果も示せてあるが、モルタル中の細骨材の増加は(2)において述べられたようにモルタルのレオロジー定数を増加させる。しかし動的弾性率 E' は増加したが動的粘性率 η' は低下している。この理由は表4・8の ϕ_m の値からもわかるようにモルタル量の増加による粘度の低下が考えられるの

表-4.8 コンクリートの配合表

重量比 C : S : G	W/C (%)	単位量 (liter/m ³)				S/a (%)	容積率 (%)		
		W	C	S	G		ϕ_p	ϕ_m	ϕ_a
1 : 1 : 1	5.0	31.8	20.2	24.4	23.6	50.9	52.0	76.4	48.0
1 : 1 : 2	5.0	25.7	16.3	19.8	38.2	34.1	42.0	61.8	58.0
1 : 1 : 3	5.0	21.6	13.7	16.6	48.1	25.7	35.3	51.9	64.9
1 : 2 : 3	5.0	18.5	11.8	28.5	41.2	40.9	30.3	58.8	69.7

ϕ_p , ϕ_m , ϕ_a : ペースト、モルタルおよび全骨材の占める容積率

と粘度は固体分最高容積濃度において無限大となるが、この値は懸濁粒子が等径の場合で0.52、⁵⁹⁾粒度を有する場合で0.67であり、それ以上の混入は間隙率を大きくするだけで実際(容積濃度)は低下していることになる、従って粘度も低下することになる。表4・8の ϕ_a の値が69.7%となっており最高固体分容積濃度を越した値となっていることから粘度が低下した原因の一つと考えて良いであろう。以上の結果からコンクリートの動的レオロジー定数はペースト濃度を一定とした場合骨材の充填状態により影響されることがわかった。

(4) 振動時の動的レオロジー定数の測定

振動時におけるコンクリートのレオロジー測定法については第3章において述べられたように球引上げ型粘度計など数少ない。本章では超音波パルス法による測定を試みた。実験装置は本章の実験で用いて来た超音波縦波パルスによる測定装置で図4・35に表わされるように減衰係数の測定は差による方法が用いられている。またコンクリートを振動させるために発振器、パワーアンプ、自励式加振装置の組合せによる振動系が加えられたのと、加振器により200Hzで縦振動が加えられるため図中の2つのピックアップに200Hzの連続正弦波が混入して波形の解析を困難にするため200Hzの正弦波を取るフィルターを付けている。また加振器の振動面とピックアップの測定位置に小型加速度計を埋設した。なお加振器の振動数を200Hzにしたのは最近の棒状振動機の振動数が12000 v.p.m 付近のものが多いからである。また実験で用いた加速度は装置の能力から最大で1.5 g程度までしか加えることが出来なかったが微かな加速度でもある傾向を見ることが出来た。

ペーストは水セメント比40%、45%、55%の3種類について実験を行った。結果を図4・36に示す。

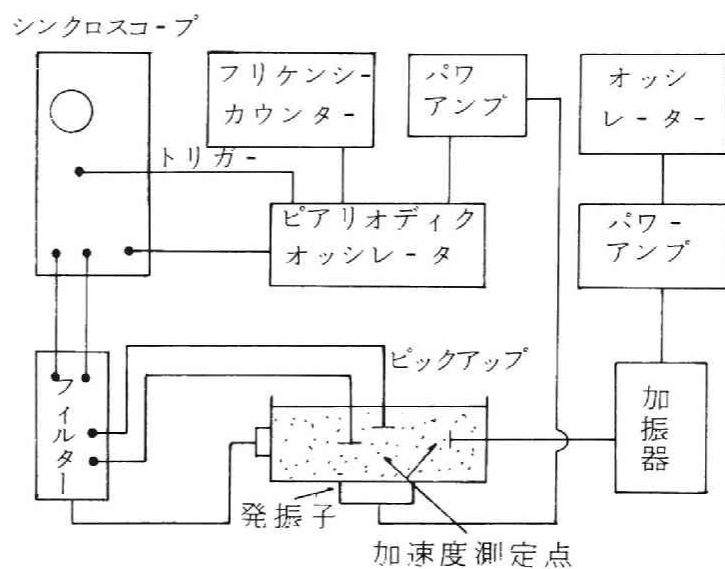


図-4.35 実験装置図

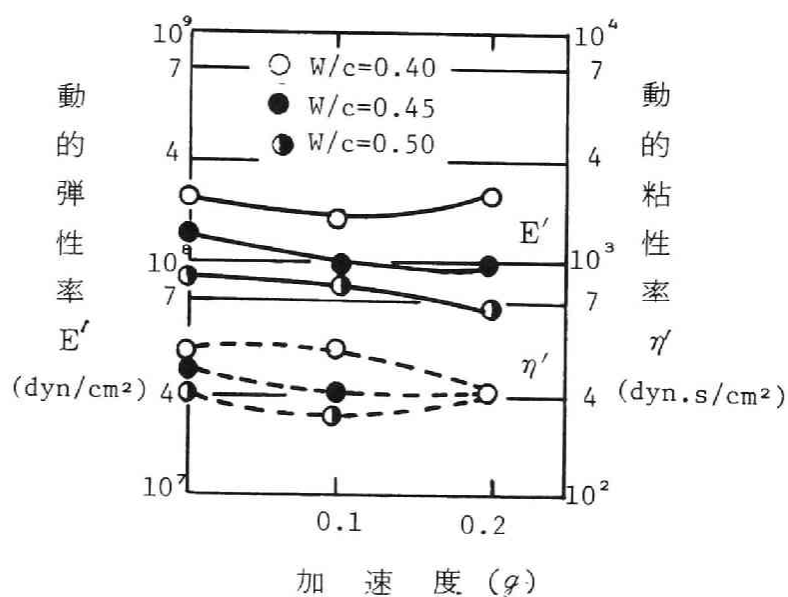


図-4.36 振動時におけるペーストの動的レオロジー定数

ペーストの動的弾性率 E' は微かな振動でも低下するが動的粘性率 η' は軟かい場合一旦低下してから逆に増加する。これは振動によりセメント粒子が沈降することにより粒子間の充填作用で一時的に動的粘性率 η' が増加したものと思われる。モルタルについてはセメント砂比を1:1と一定にして水セメント比を40%, 45%, 55%の3種類にとって実験を行った。結果を図4・37に示す。モルタルはセメント骨材比一定にした場合、水セメント比によって余りレオロジー定数

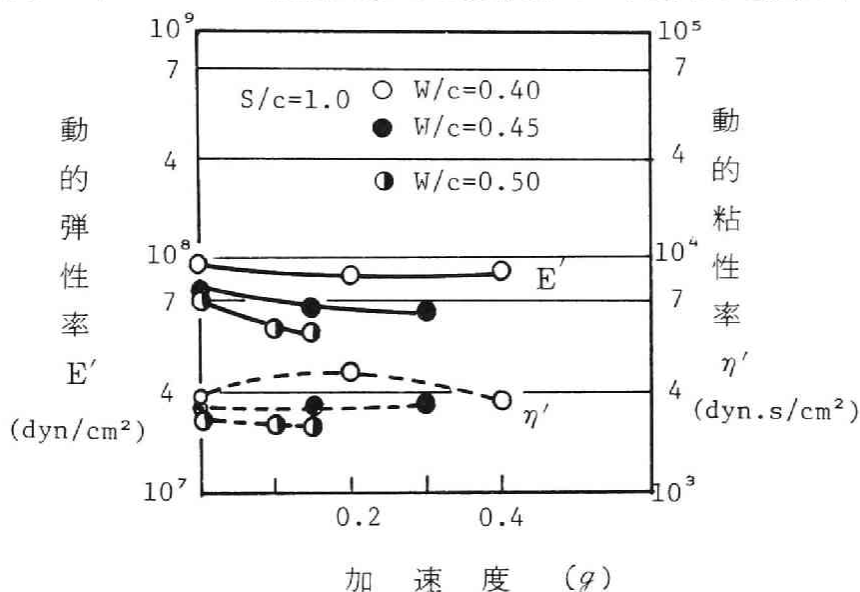


図-4.37 振動時におけるモルタルの動的レオロジー定数

は影響されないが、傾向としては動的弾性率 E' は水セメント比の大きなものほど振動により低下するし、動的粘性率 η' はペーストの軟かい場合と同様の傾向を示している。

コンクリートについては細骨材率 S/a を一定として水セメント比を変化させた場合と、水セメント比一定として細骨材率を変化させた場合について実験を行った。図4・38は細骨材率を50%とし、水セメント比を40%, 50%, 60%の3種類に変化させ、振動加速度を1g付近まで増加させた場合の動的レオロジー定数を測定した結果である。動的弾性率、動的粘性率ともに加速度の増加により減少するが、特に水セメント比の小さなコンクリートは振動による動的弾性率の低下が著しく、逆に水セメント比の大きなコンクリートは

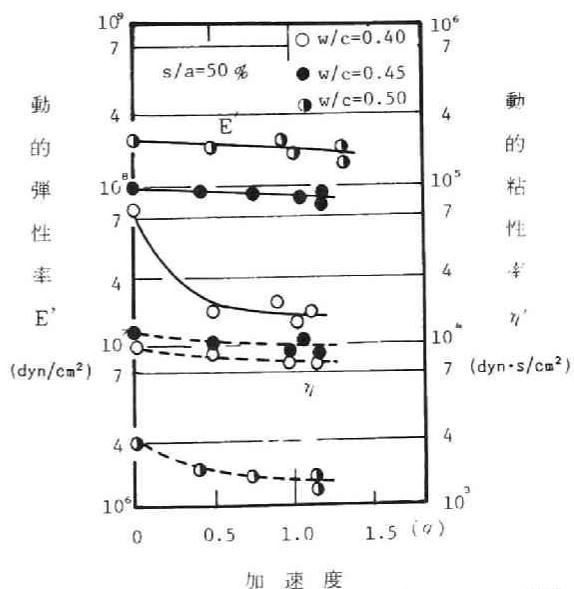


図-4.38 コンクリートの振動時における動的レオロジー定数
(w/c 変化)

動的粘性率の低下が著しい。動的粘性率を流動性の指標と考えると振動によるコンクリートの流動性は良くなるが水セメント比が40%から60%範囲では水セメント比を大きくした方が0.5g程度の小さな加速度で流動性を良くすることができる。また動的弾性率をコンクリートの硬さと考えると加速度の増加によりコンクリートは軟らかくなって行く。特に水セメント比が40%のコンクリートでは傾向が著しい結果となっている。原因は間隙水圧が関係すると考えられるが間隙水圧の測定をしていないので十分な考察は行えず、ここでの言明は避け今後の課題としたい。

次に水セメント比を50%に固定して細骨材率を30%、35%、40%、50%、と増加した場合の結果を図4・39に示す。水セメント比が一定の場合1g付近までは動的レオロジー定数には変化は

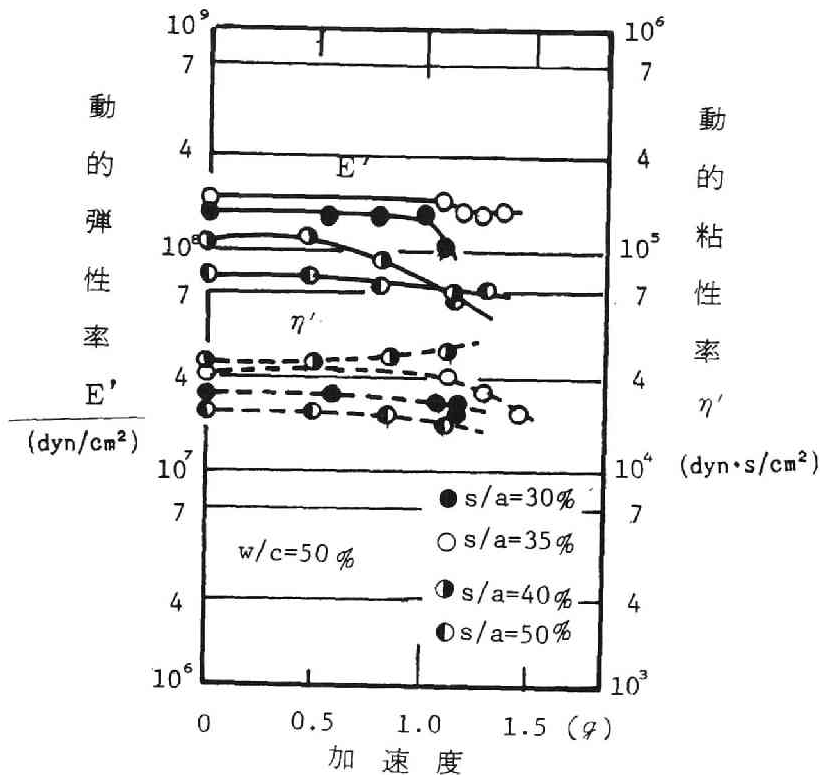


図-4.39 コンクリートの振動時における動的レオロジー定数 (s/a変化)

少ないが、1gを越すと、細骨材率が35%以下の配合ではレオロジー定数が一時的に低下する。これは40%以上の細骨材率を有するコンクリートに比べて細骨材が少ないので保水能力はそれだけ劣る訳で1g、200Hzの圧縮波によってブロック内の水が解放されレオロジー定数の低下を起こしたものと考えられる。振動中のコンクリートのエネルギー伝播についてKirkham⁶⁰⁾は次式で表示できるとしている。

$$W = C_1 m S^2 f^3 t \quad (4 \cdot 68)$$

ここでW : エネルギー, C_1 : コンクリートの硬さと減衰によって求められる定数, m : コンクリート重量, S : 振幅, f : 振動数, t : 時間

上式における C_1 が本研究で得られた E' に相当する値であり、振動締め固めのエネルギーは、動的弾性率によって影響されることがわかる。従って振動締め固め性能を調べる場合は E' の特性を把握しておけば良いことになる。

次にコンクリート中を伝播する波について ACI Committee 309⁶¹⁾の報告によると、正弦圧縮波のコンクリートへの伝播を次のように表示している。

$$S_x = S_0 e^{-\Omega x/2} \quad (4 \cdot 69)$$

ここで、 S_x : 振幅が S_0 である点から x の距離における振幅、 Ω : 減衰係数また正弦圧縮波の最大圧力 P は次式で与えられる。

$$P = v c \rho \quad (4 \cdot 70)$$

ここで、 v : 最大粒子速度、 c : 波の速度、 ρ : 密度

次に波の伝播に関する一般式として

$$c = \lambda f = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (4 \cdot 71)$$

ここで λ : 波長、 f : 周波数、 E : 動弾性係数

波の速度に関しては、Halken⁶²⁾によると振動の第1段階では45m/sec、1～2分で60から250m/secである。また平均速度を150m/secとして200Hzの時の波長を計算すると、0.75mになる。Halkenの実験室による実験結果として動弾性係数がフレッシュコンクリートの場合3MPa (2.94×10^7 dyn/cm²) であると報告している。本研究における動的弾性率 E' は $2 \times 10^7 \sim 2 \times 10^8$ dyn/cm² (2MPa～20MPa) の範囲に入っており、Halkenの値に近い値である。図4・40は水セメント比40%、細骨材率50%のコンクリートを30分毎に90分までの経時変化を測

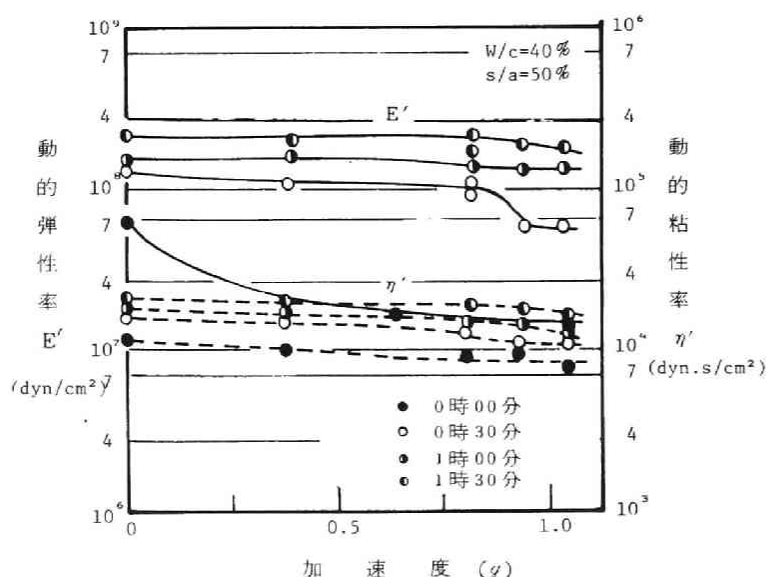


図-4.40 コンクリートの振動時における動的レオロジー定数の経時変化

定した結果である。動的レオロジー定数は時間とともに増加して行くが、1gまでの加速度での振動によってその勾配は緩らくなっていく。そして動的レオロジー定数が急激に低下する加速度が時間の経過とともに大きくなって行くことがわかった。このことはコンクリートが時間の経過に伴って構造を形成し、その構造が強固になって行く現象を捕えているからである。

4・3・6 まとめ

フレッシュコンクリートの縦波伝播特性のレオロジー的評価に関する実験結果をまとめると以上の結論が得られた。

- (1) コンクリートの配合を種々変化させた場合、練り混ぜ直後のコンクリートの縦波伝播速度には有意義な差は認められなかったが、伝播速度の他に透過周波数、減衰係数を考慮に入れレオロジー的に考察することによってフレッシュコンクリートの性質をある程度数値的に表現することができる。
- (2) ペーストの動的レオロジー定数はペーストの濃度により急激に変化する。ペーストの動的弾性率は水セメント比との間に指数関係があり、また動的粘性率と水セメント比の間にはべき関数の関係がある。
- (3) モルタルの動的レオロジー定数は骨材量が多くなるにつれて大きくなる。
- (4) コンクリートの動的レオロジー定数はペースト濃度を一定とした場合、細・粗骨材の充填状態が密になれば増加する。
- (5) 内部振動機によって振動を受け液状化しているコンクリートのレオロジー定数を超音波パルス法で測定することは可能である。この方法によって測定した結果では、振動下の動的レオロジー定数は振動機の加速度が大きくなると低下する。動的弾性率の値が大きくなると振動中のコンクリートのエネルギー伝播は良くなる。
- (6) 内部振動機によって液状化しているコンクリートの動的弾性率は水セメント比50%、細骨材率が30%から50%程度のコンクリートで2MPaから20MPaの間で変化した。
- (7) コンクリートの振動時におけるレオロジー定数は経時的に増加して行くが、1g以下の加速度での振動では加速度の増加によるレオロジー定数の低下割合が少なくなる。またレオロジー定数が急激に低下する加速度も経時的に増加して行く。

4・4 結 語

本章では超音波の縦波パルスの伝播挙動を観測することにより練り混ぜ直後におけるフレッシュな段階にあるペースト、モルタル、コンクリートの配合と縦波伝播速度・動的弾性率・動的粘性率の各要素との関係を調べた。得られた主な事柄を要約すると、次のようである。

- 1) フレッシュペースト・モルタル・コンクリートの縦波伝播速度は、練り混ぜ直後においては、空気量によって決まり、その伝播速度は一般に用いられる配合では100 m/sec前後となる。従って伝播速度のみでコンクリートの品質判定は難しいと言える。
- 2) 練り混ぜから数時間経過すれば、縦波伝播速度に配合要因の影響が表われてくる。特に水セ

メント比やセメントの種類の影響が大きいことから、水和作用が伝播速度に影響する最大要因である。

3) フレッシュペースト・モルタル・コンクリートの縦波伝播速度式としては練り混ぜ直後においては分散系の速度式(4・15)が適用でき、実用式としてはペーストの伝播速度を実測することで(4・13)(4・14)式が適用できる。また数時間後からは多孔質弾性体の波動理論式である(4・48)式が適用可能である。

4) 練り混ぜ直後のペースト・モルタル・コンクリートの縦波伝播速度と配合要因との間には明確な差は見出せなかった。しかし、フレッシュな段階にある試料を通過する縦波の伝播挙動を伝播速度の他に透過周波数、減衰係数を測定することによって動的弾性率および動的粘性率が得られ、これを指標としてペースト・モルタル・コンクリートのフレッシュな段階における性質を数値的に表現することができた。

5) 練り混ぜ直後のペーストの動的弾性率、動的粘性率との関係は、それぞれ指数関数およびべき関数で表わすことができる。しかし、モルタルやコンクリートでは骨材の充填状態が密になるほど動的レオロジー定数は増加する動向にあるが数式化するまでには至らなかった。

6) 内部振動機により振動を受けているコンクリートの動的レオロジー定数を超音波パルス法により測定することは可能である。実験の結果コンクリートの動的レオロジー定数は振動機の加速度を大きくすれば低下することが判明した。動的弾性率の値が大きくなると振動中のエネルギー伝播は良くなり振動範囲が広がる。この場合の動的弾性率は水セメント比50%、細骨材率30%か%のコンクリートで2~20MPaの間で変化する。

参 考 文 献

- 1) 岡田清, 六車熙 監修, :“コンクリート工学ハンドブック” 朝倉書店, 1981, (27-259)
- 2) 西林新蔵, :“フレッシュコンクリートの性質—レオロジー的アプローチ”, 材料, Vol. 24, No. 260. 1975, (358-367)
- 3) Powers, T. C. : “The properties of fresh concrete.” Jhon Wiley & sons, N. Y. (437-532)
- 4) 近藤泰夫, 坂静雄 : “コンクリート工学ハンドブック” 朝倉書店, 1971, (206-209)
- 5) Gorur, K. M. K. Smit, F. H. Wittmann, : “Microwave study of hydrating cement paste at early age” Cement and Concrete Research, Vol. 12, No. 4, 1982, (447-454)
- 6) 前掲の4)
- 7) Mitchell, L. J. : “Dynamic testing of materials.” Proc. Highway Research Board, Vol 33, 1959, (242-256)
- 8) Andersen, J., and P. Nerenst, : “Wave velocity in concrete, ” ACI Jour. Proc. Vol. 48, No. 8, 1952, (613-635)
- 9) 角田 忍, 明石外世樹, : “フレッシュコンクリートの縦波速度について, ”土木学会第25回年次学術講演会講演概要集, V部, 昭和45年, (85-86)

- 10) 岡田清, 水口裕之, : “フレッシュモルタルのレオロジー定数に関する実験” 土木学会第26回年次学術講演会講演概要集, V部, 昭和46年, (287-238)
- 11) 明石外世樹, : “コンクリートの非破壊試験(Ⅱ)”, “材料”, Vol.28, No.314, 1979, (1079) 1090)
- 12) 柏忠二編著: “コンクリートの非破壊試験法” 技報堂(非売品), 1980 (著者注)コンクリートの非破壊試験に関する主要な論文および規格が編集されており703編の文献が紹介されている。
- 13) Whitehurst, E. A. : “Use of the Soniseorpe for measuring seting time of concrete, “Proc. of ASTM, Vol. 51, 1951, (1166-1176)
- 14) Cheeseman, W. J. : “文献13) のDiscussion 中の報告” (1176-1183)
- 15) Jones, R. : “A nondestructive method of testing concrete during hardening,” Concrete and Construtional Engineering (London), Vol.44, No.4, 1949, (127)
- 16) 角田忍, 明石外世樹: “超音波法によるフレッシュベーストおよびモルタルの物性変化の特性” 土木学会, フレッシュコンクリートの物性値測定ならびに挙動に関するシンポジウム論文集, 1983, (41-46)
- 17) 角田忍, 明石外世樹: “超音波法による凝結初期におけるセメントベーストおよびモルタルの物性変化の測定” Vol.32, No. 353, 1983, (175-181)
- 18) 西林, 吉野, 前田, 前島: “フレッシュコンクリート中の波動伝播特性に関する研究” 鳥取大学工学部研究報告, Vol.11, No.1, 1980, (214-221)
- 19) 佐治泰次, 松藤泰典: “初期材令におけるコンクリートの諸性状” コンクリート工学, Vol.19, No.5, 1981 (3-12)
- 20) Stepisnik, J., M. Lukac, I. Kocuvan, : “Measurement of cement Hydration by Ultrasonics, “Ceramic Bulletin, Vol.60, No.4, 1981, (481-483)
- 21) Van der Winden, N. G. B, A. W. Brant, : “Ultrasonic testing for fresh mixes Concrete, Vol.11, No.12, 1977, (25-28)
- 22) Casson, R. B., P. I. J. Domone, : “Ultrasonic monitoring of the early age properties of concrete,” Proc. of International Conf. on Concret at Early Ages, 1982, (129-135)
- 23) Byfors., J., : “Pulse velocity measurments for indication of compressive strength at early ages,” Proc. of Int. Conf. on Concrete at Early ages, 1982, (117-122)
- 24) Elvery, R. H. : “Ultrasonic assessment of concrete strength at early ages”, Mag. of Conc. Res., Vol.28, No.97, 1976, (181-190)
- 25) Mailer, H. : “Pavement thickness measurement using ultrasonic techniques”, Highway Res. Board, No. 348, 1972, (20-28)
- 26) de Haas, G. D. et al, “The shrinkage of hardening cement paste and mortar,” Cem. and Conc. Res., Vol.5, No. 4, 1975, (295-320)
- 27) 藤森聡雄著: “やさしい超音波の応用”, 産報, 1972, (16-23)
- 28) 実吉純一, 菊池喜充, 能本乙彦監修, “超音波技術便覧, 日刊工業社, (530-579)
- 29) Elvery, R. H., : “Ultrasonic testing of concrete-The use of the PUNDIT”, C. N. S. Electronics LTD, March 1972 [前掲の12) pp 431-456]
- 30) 角田忍, 明石外世樹, : “フレッシュコンクリートの縦波速度に関する二・三の基礎的実験,”明石工業

- 高等専門学校研究紀要, No. 13, 1972 (37-46)
- 31) 藤森聡雄 : 前掲の27) (13)
 - 32) ASTM Designation E 24-58T, BS 5168, BS2787など
 - 33) Jones, R., : "The nondestructive testing of concrete.," Magazine of Conc. Res., No. 2, 1949, [前掲の12) pp473-497]
 - 34) Casson, R. B., P. I. J. Domone, : 前掲の22)
 - 35) 和田八三久著 : "音波物性", 共立出版, 昭和44年, (105-110)
 - 36) 前掲の28) (151-158)
 - 37) 岡野光治 : "分散系のみかけの粘弾性定数" 応用物理, Vol.36, No. 12, 1967, (1003-1007)
 - 38) Urick, R. J., : "The absorption of sound in suspensions of irregular particles," The Jour. of the Acoustical Society of America, Vol.20, No. 3, 1948, (283-289)
 - 39) Urick, R. J., W. S. Ament, : "The propagation of sound in composite media," The Jour. of the Acoustical Society of America, Vol.21, No. 2, 1949, (115-119)
 - 40) Wyllie, M. R. J., A. R. Gregory, L. W. Gardner, "Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media," Geophysics, Vol.21, No. 1, 1956, (41-70)
 - 41) Nwokoye, D. N., : "Prediction and assessment of concrete properties from pulse-velocity tests", Mag. of Conc. Res., Vol.25, No. 82, 1973, (39-46)
 - 42) Reynolds, W. N., S. J. Wilkinson, D. C. Spooner. : "Ultrasonic wave velocity in concrete," Mag. of Conc. Res., Vol. 30, No. 104, 1978, (139-144)
 - 43) Biot, M. A. : "Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid", Jour. of the Acoustic Society of America, Vol.28, No. 2, 1956, (168-178)
 - 44) Biot, M. A., D. G. Willis, : "The elastic coefficients of the theory of consolidation", Jour. of Applied Mechanics, Vol.79, 1957, (594-601)
 - 45) Ishihara, K., : "Approximate forms of wave equations for water-saturated porous materials and related dynamic modulus", Soils and Foundations, Vol.10, No. 4, 1970, (10-38)
 - 46) Ishihara, K., "On the longitudinal wave velocity and Poisson's ratio in saturated soils", Proc. of 4th Asian Regional Conference, Bangkok, Vol. 1, 1971, (197-201)
 - 47) Skempton, A. W., "Effective stress in soils, concrete and Rock," Pore pressure and suction in soils, John and Wiley and Sons, N. Y., (4-16)
 - 48) 當山道三 : "土質力学," コロナ社, (67)
 - 49) 祖父江實 監訳 : "フェリー高分子の粘弾性," 東京化学同人, 1968, (77-98)
 - 50) 高分子学会編 : "高分子測定法=構造と物性上", 培風館, (342-355)
 - 51) 和田八三久著 : "音波物性" 共立出版, 1969, (3-12)
 - 52) 岩柳茂夫著 : "レオロジー", 朝倉書店, 昭和46年 (1971), (100-104)
 - 53) 中川鶴太郎, 神戸博太郎著 : "レオロジー"
 - 54) 前掲の12), (31-47)
 - 55) 日本非破壊検査協会編, "非破壊検査便覧", 日刊工業新聞社, (437-461)
 - 56) 日本學術振興會製鋼第19委員會編, "超音波探傷法," 日刊工業新聞社, (220-239)
 - 57) 明石外世樹 : "コンクリート中の超音波の減衰について", セメント技術年報, Vol. 12, 1958,

(329-334)

- 58) 角田忍, 明石外世樹 : “コンクリートの粘度式,” セメント技術年報, Vol. 33, 1979, (227-230)
- 59) 平井英二著 : “レオロジー”, 科学技術社, 昭和53年(1978), (56-64)
- 60) Kirkman, R. H. H., M. G. White, “The compaction of concrete road slabs, ” Road Research Technical Paper No 54, Her Majestys Stationery Office , London, 1962, (61)
- 61) ACI Committee 309, “Behaviour of fresh concrete during vibration,” ACI Journal committee report on ACI 309, 1 R-81, 1981, (36-53)
- 62) Halken, O. V., “Technology of concrete consolidation, ” Betongelentforeningen, Copenhagen, 1977.

第 5 章 音波特性によるフレッシュ コンクリートの物性の経時 変化測定に関する研究

第5章 音波特性によるフレッシュコンクリートの物性の経時変化に関する研究

5・1 概 説

コンクリートが練り混ぜられ、運搬、打設、締固め、仕上げ作業など一連の作業をしている間、セメント粒子は水の接触があった時点から水和反応を開始することからフレッシュコンクリートの性質は、セメントの水和過程におけるドルマン期において一時的に鈍化するものの時々刻々変化する。フレッシュコンクリートは練り混ぜから上述の一連の作業を終え、固化を開始するまでと定義する場合と型枠に静置するまでと定義する場合と、二つの考えがあるが本章では前者を取ることにする。時間が経過するに従って関連する問題も種々変化する。運搬時間、表面仕上げ開始時間、練り返し可能時間、再振動可能時間、移動型枠の移動時期など多くの問題が関わりあってくる。このように問題が重要であるにもかかわらず、この方面の研究が不足しているのは佐治らの指摘にもあるように、この時期のコンクリートの性質の経時変化を捕えるには静置したまま行わなければならないということにある。こうした条件を満足する方法を挙げると、電気抵抗による方法²⁾、貫入抵抗法³⁾、超音波速度測定⁴⁾、局部破壊試験⁵⁾、引抜き試験⁶⁾⁷⁾、温度測定（マチュリティー関数）⁸⁾⁹⁾、フレキシブルな容器に詰めたコンクリートの圧縮強度変化を求める方法¹⁰⁾、変形能力の変化による方法等があるが、将来現場において型枠に打設されたコンクリートそのものについて測定を行うことが可能な方法としては、電気抵抗法、超音波法は有力である。しかし、現在まで前者の方法は混和剤が使用された場合や鉄筋コンクリートの場合には用をなさないといえるので、後者の方が汎用性の点で有利である。

本章ではフレッシュコンクリートの物性の経時変化を超音波法により、音波パルスの伝播速度および減衰特性を測定して、その粘弾性特性を調べ、配合要因との関係を明らかにすることを目的として実験的研究を行った。

5・2 パルス波の伝播速度の経時変化

5・2・1 はじめに

第4章において明らかにしたように、練り混ぜ直後において懸濁液の状態にある間は、フレッシュコンクリート中に発射された弾性波パルスの速度増加は余りみられない。しかしコンクリートの中の各粒子が沈降し、粒子間の接触点が増加するにつれて、フレッシュコンクリートが構造体を形成するようになると伝播速度は増加し始め、セメントペーストの水和作用が進行するのに伴って急速な速度増加をする。コンクリート中を伝播する弾性波速度はコンクリートを多相材料であると考え、骨材の伝播速度は一定であると考えられるからペーストの速度により決まることになる。従って、コンクリートの伝播速度の経時変化は、コンクリートの凝結硬化過程を表わしていることになると考えられる。コンクリートを多相材料とすれば各相をペースト—骨材、

モルタル—粗骨材に分ける 2 相材料, 水—セメント—骨材, ペースト—細骨材—粗骨材, ペースト—界面—骨材, モルタル—界面—粗骨材に分ける 3 相材料であると考えることができる。これらの各相を直列(均等応力)または並列(均等ひずみ)に結べば伝播速度は計算できる。一般に波動伝播の場合直列で連結している場合が多い。Jones¹²⁾はモルタルと粗骨材の 2 相直列モデルを提案している。Kaplan¹³⁾は 13 種類の粗骨材を用いてこの考えを応用している。Nwokoye¹⁴⁾はペースト—細骨材—粗骨材の 3 相直列モデルを提案している。従って, 硬化コンクリートについては各相の伝播速度および容積率が判かっている場合には, コンクリートの伝播速度は比較的良好な精度で推定できるとしている。また Reynolds¹⁵⁾ら, Boucher¹⁶⁾の論文に示唆を得て, コンクリートを均等に配置された気泡を有するペーストと球形骨材からなる 2 相直列とし, 各相の体積弾性率および剛性率からコンクリートの体積弾性率および剛性率を求め, 伝播速度を計算する方法で, 実測値と計算値が比較的良好な精度で一致することを示した。若材令コンクリートに関する研究では, Byfors¹⁷⁾のペースト—界面—骨材の 3 相材料とする研究がある。単に骨材の速度とモルタルの速度を合計するとコンクリートの実測値は計算値より低い値となる。この原因は骨材とマトリックスとの界面の薄膜層の部分が入っていないためであるとして, この界面厚を計算に入れることによって精度が向上すると報告している。これらは伝播速度の理論についての言及は行っていない。配合要因や温度などと伝播速度の関係についての実験結果については Elvery¹⁸⁾ら, Van der Winden¹⁹⁾ら Casson²⁰⁾等の研究があり, 伝播速度は水セメント比, 養生温度, 単位セメント量, 混和剤などにより変化すると報告している。縦波伝播速度と圧縮強度との関係については Elvery²¹⁾らや, Tomsett²²⁾によって研究が行われ, 水セメント比や温度にはほとんど影響されず, 骨材量とセメントの種類に依存すると述べている。また伝播速度によって圧縮強度を判定する場合, 伝播速度が 2 km/sec 以下では信頼性が低く, 2 km/sec 以上において強度判定が可能であるとしている。Tomsett も同様な報告をしている。Elvery の論文における特徴は, 伝播速度は各種要因により種々の経路をたどって増加するので, 速度増加率や強度増加率という考えを始めて導入し, 凝結あるいは水和反応速度と関連づけている点にある。

次に縦波は粗密波であるから, 固体・液体・気体のすべてを伝播することができるが, 横波は液体・気体は剛性率を有さないから伝播することは出来ない。したがって, フレッシュコンクリートは縦波でも減衰が大きく透過しにくいのであるから, 水—セメント—骨材系サスペンションであると考え, ほとんど伝播しないであろうと考えられてきた。しかし, 練り混ぜ直後において分散系にあってもセメントペーストがフロックを形成したり, 骨材粒子の沈降により骨格ができ上がると, 僅かであっても剛性を持つようになるから, 横波の伝播は可能であると考えられる。横波伝播速度の実測例は非常に少なく, 佐治・松藤の例がある位である。1983 年発行の Tattersall, Banfill の 'The Rheology of Fresh Concrete' という書の中で Jefferis の private communication として紹介されている程度で, 具体的には不明である。佐治らは水セメント比 27%, 35%, 45% のペーストについて Elvery と同様に速度増加率—時間曲線を描くと最小値, 最大値が得られ, 極値における伝播速度がそれぞれ約 100 m/sec, 約 400 m/sec で水セメント比に関わらずほぼ一定であったと報告している。ここで縦波速度 V_l および横波速度 V_s は次式により求まる。

$$V_l = [(K^* + 4/3 G^*) / \rho]^{1/2} \quad (5 \cdot 1)$$

$$V_s = (G^* / \rho)^{1/2} \quad (5 \cdot 2)$$

ここに K^* はみかけの体積弾性率、 G^* はみかけのずり弾性率で ρ はみかけの密度である。上式から伺えるように、パルス速度は弾性係数と密度の関数であり、弾性係数が強度と関係することから、超音波のパルス速度から圧縮強度を推定しようとする研究は古くから行われている。1981年の5月にパリで行われた「コンクリートの初期材令における性状」に関するRILEMのシンポジウム²⁴⁾における超音波速度測定についての総括で、パルス速度と強度の関係は、材令後期や高強度の場合は感度が鈍いが、初期材令では強度の違いがパルス速度に明瞭に反映するとしており、この方法は初期材令に適していると述べられている。このことは上述の Elvery らの実験結果と相反するようであるが、彼らの実験装置は伝播時間がデジタル式のものを用いており、波形観測型の装置で第1波の立ち上りをブラウン管上で鋭くして読みとることで、伝播速度の測定精度を向上させることは十分可能である。

コンクリートの物性変化はセメントの水和率とよく対応しており、Fulton²⁵⁾ と Jung²⁶⁾ によると圧縮強度と吸着水量とが密接な関係があるとし、この関係の特異点がセメントの($C_3A + C_4AF$) 量の差であるとしている。総括として水和によるコンクリートの物性変化は空隙量の変化で説明でき、強度や弾性係数がポロシティーと関係するとしている。次にコンクリートの強度増加はセメントの種類、水セメント比、混和剤、養生条件によって違うが、水セメント比と温度の関係については図5.1のようになる。これは水和度が水セメント比によって影響されることを示しており、温度の上昇はマチュリティーの増加を意味するだけである。またこの図において

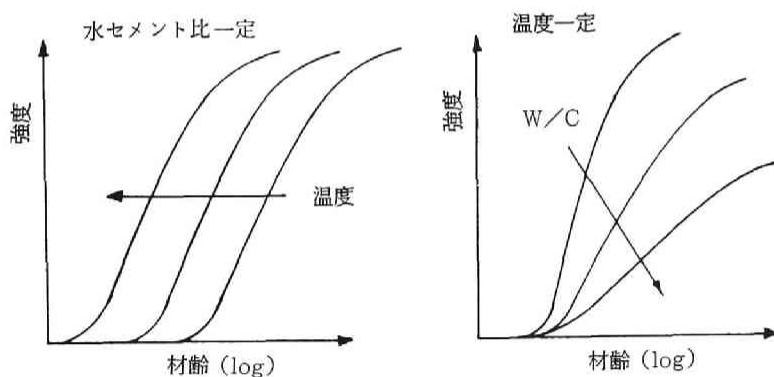


図5.1 水セメント比と温度の影響 (模式的)²⁴⁾

強度の軸をパルス速度と置き換えることは可能である。何故ならコンクリートのパルス速度はセメントの水和度と直接関係すると考えられるからである。

本節では、ペースト、モルタル、コンクリート中に縦波および横波の超音波パルスを発振させ、その伝播速度の経時変化曲線と配合要因との関係について実験を行ない考察する。

5・2・2 実験方法

(1) 実験装置

縦波および横波のパルス速度が同時に測定可能なように、プラスチックの円筒型枠（図5.2）をペースト、モルタル用、コンクリート用として同一形状寸法のを2個一組で作成し、中央

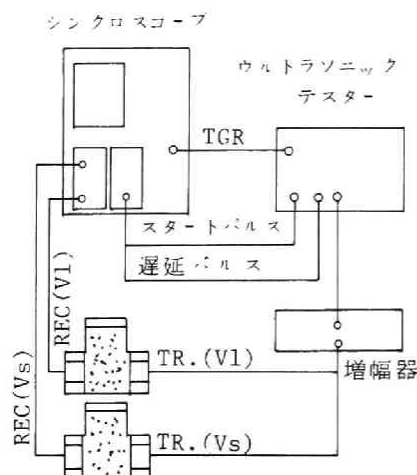


図5.2 実験装置図 (1)

に発振子、受振子に与える試料圧を一定にする目的で煙突状の突起を設けた。また縦波速度のみ測定する場合（骨材と伝播速度の関係など調べる場合）は図5.3の装置を用いた。発振子および受振子は縦波および横波用のジルコン酸鉛チタン酸バリウム系（PZT系）振動子の50 KHz用を用いた。基本的には第4章に用いた装置と同一である。

(2) 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメント、早強ポルトランドセメント、起早強ポルトランドセメント（いずれも日本社）を用いた。

骨材は、骨材の粒径、粒度がパルス速度に及ぼす影響を調べる目的の場合は、比重 2.69、吸水率 0.6%の高槻産硬質砂岩碎石を破碎し表5.1のように7種類に分級した。また粗粒率が図5.4に示す3種類の粒度調整骨材を製造した。碎石の縦波速度を得る為に、碎石中から一辺が30mm程度の立方体に近い代表的骨材を10個選び出して二面が平

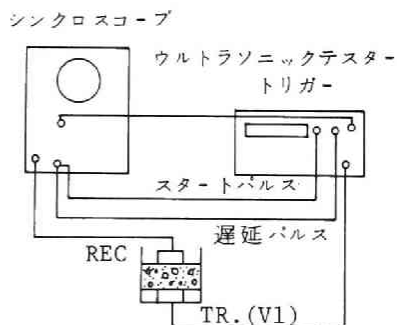
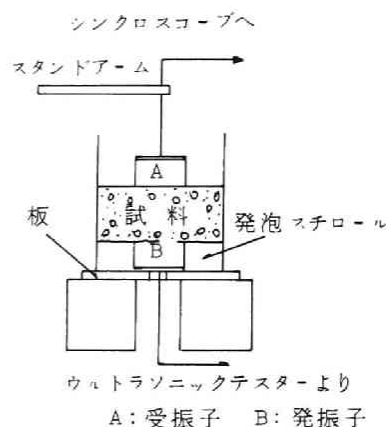


図5.3 実験装置図 (2)
(上図：測定部，下図：ブロック図)

表5.1 実験に用いた骨材粒径

No	粒 径 (mm)
1	0.15 0.3
2	0.3 0.6
3	0.6 1.2
4	1.2 2.5
5	2.5 5.0
6	5.0 10
7	10 20

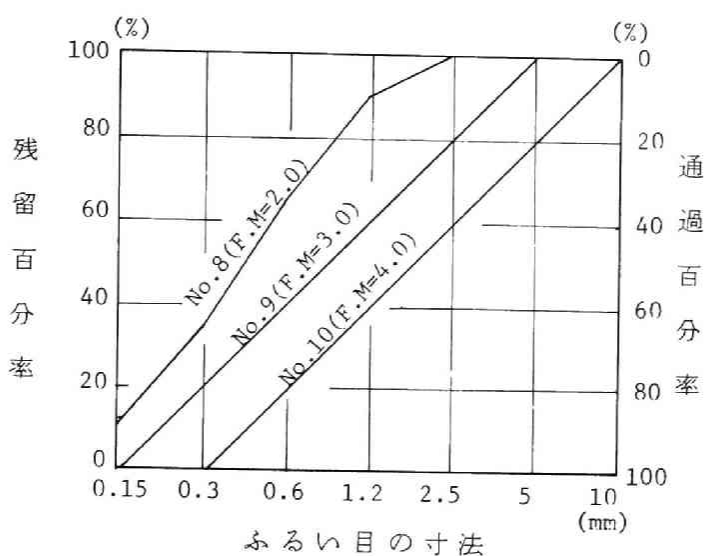


図 5.4 実験に用いた骨材の粒度分布曲線

行になるように成形し、各々のパルス速度を測定した。その結果、平均速度は 5150m/s で砂岩の縦波速度が 5152m/s とされていることから、ほぼ等しい結果が得られたので、この碎石の速度を 5150m/s として解析に用いることにした。

これら以外の実験では、細骨材として豊浦産標準砂、または比重 2.57、吸水率 1.3%、粗粒率 2.76 の川砂を、粗骨材として上述の碎石の 5 から 20mm のものを使用した。

(3) 配合条件

セメントペーストは水セメント比 30%、40%、50% の 3 種類についてペーストの濃度がパルス速度に及ぼす影響を調べることとし、水セメント比 40% のペーストについてはセメントの種類を普通、早強、超早強の 3 種類について実験を行うことにした。モルタルについては、水セメント比を 50% と一定にして、標準砂をセメント重量に対して 0.5、1.0、1.5、2.0 倍の重量を混入させ、骨材量の影響について実験を行うことにした。また碎石骨材については粒径の影響を調べる場合はセメント重量に対して骨材重量を 1.0、2.0 倍とし、粒度の影響を調べる場合は 1.0 倍とした。水セメント比は 45% とした。

コンクリートは細骨材率を一定 ($S/a=51.1\%$) として水セメント比を 45%、55%、65% の 3 種類について実験を行うことにした。示方配合表を表 5.2 に示す。

表 5.2 示 方 配 合 表

M.S (mm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単 位 量 (Kg/m^3)			
				(W)	(C)	(S)	(G)
20	2 ± 1	45	51.1	191	425	850	850
20	2 ± 1	55	51.1	224	407	815	815
20	2 ± 1	65	51.1	224	391	782	782

(4) 実験手順

練り混ぜはペースト、モルタルはモルタルミキサー（JIS R 5201）によって、注水後3分間行うことにしたが、砕石モルタルについてはミキサーにより骨材が破碎されることもあるので、すべて手練りとし2分間空練り、3分間本練りとした。コンクリートについては、50ℓ用強制練りミキサーで2分間の練り混ぜを行った。

測定は練り混ぜて型枠に詰め締固めるまでの時間に変動があるので、注水時刻を測定開始時間とした。測定はペースト、モルタルについては28日まで行い、24時間測定後、型枠を脱型して水中養生を行い、7日、14日、28日などの材齢での速度を測ることにした。実験温度はペースト、モルタルは $20 \pm 3^\circ\text{C}$ で行ったが、コンクリートについては $16 \pm 3^\circ\text{C}$ の範囲で行った。

図5・2、図5・3のウルトラソニックテスター（シンエイ電子US-201）はシンクロスコープのブラウン管において波形を観測出来るものであり、伝播時間はブラウン管における受振波形を出来る限り増幅し、波形の立ち上りを鋭くして伝播時間Tを読み取ることとした。パルス速度Vは既知距離Lとして $V=L/T$ (m/s) によって計算した。なお、4章において明らかとなったように練り混ぜ直後における空気量が伝播速度に影響を及ぼすので、空気量をJIS A 1118 の容積法によって同時に測定した。

5・2・3 実験結果および考察

(1) ペースト、モルタルおよびコンクリートの縦波伝播速度の経時変化

セメントペーストの縦波速度は5・2・1で述べたように水和の程度を表わすものである。従ってペーストの水セメント比によって速度増加曲線の速度増加が最も著しい材齢が同じであっても、その勾配に影響するはずである。図5・5はセメントペーストの縦波速度の増加曲線と水セメント比の関係を表わしたものである。図中の実線が普通ポルトランドセメントの水セメント比を30%、40%、50%とした場合であるが、速度増加の最も大きい材齢が4時間から12時間の範囲にある。

そして、水セメント比の違いによる水和物の析出量すなわち、間隙量の差異が速度を決定する

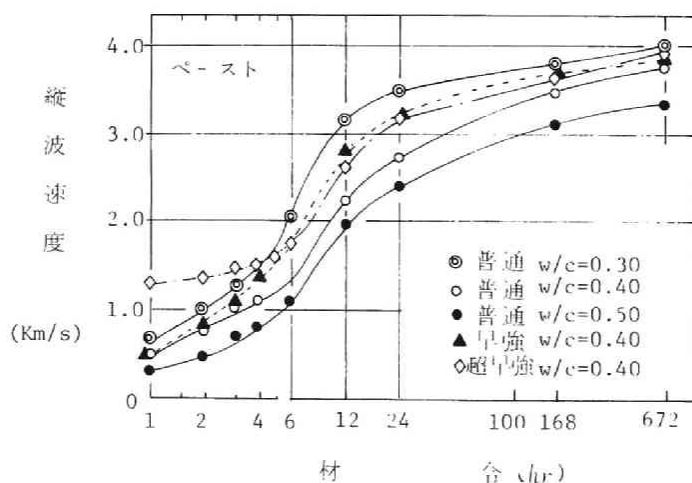


図5.5 セメントペーストの縦波速度—時間曲線

ものと推察できる。また、早強、超早強セメントを使用して、水和を速めてやると、若材齢においては速度の増加が急となるが、材齢28日においてはほとんど変わらず、コンクリートの強度発現と同じ傾向を示すことがわかる。

モルタルについては第4章の4・2・4において、ペーストの速度を測定すれば、コンクリート、又はモルタル中の骨材の間隙率がわかれば速度が計算できるとする Wyllie²⁸⁾の式が適用できるという結果を得た。図5.6の水セメント比 $W/C=50\%$ として砂セメント比を $S/C=0.5$ から2.0まで変化させたモルタルの速度増加曲線の結果はその妥当性を示すものである。

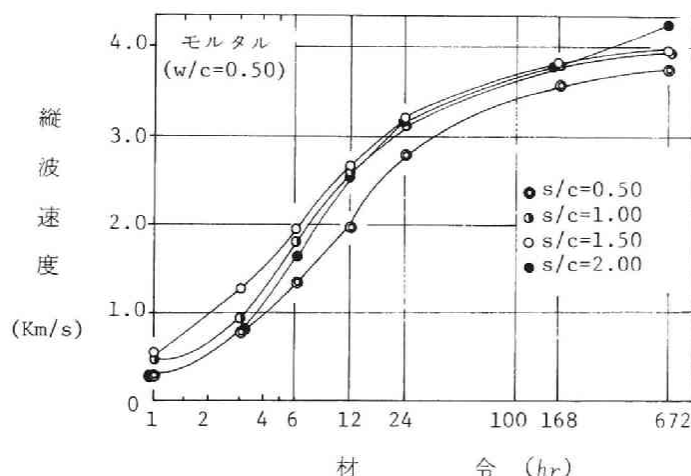


図5.6 モルタルの縦波速度の経時変化

すなわち、骨材量の増加による間隙率の減少が速度を増加させるが、曲線の形状はペーストと同じであり、セメントの水和によってモルタルの速度増加曲線が決まることを示したものである。次に骨材の粒径がパルス速度にどのように影響するのかについて行った実験の結果を図5.7、図5.8に示す。図5.7はセメント骨材重量比を1.0、水セメント比45%の単一粒径骨材モルタルの縦波伝播速度の経時変化を表わしている。図よりペーストの凝結によってパルス速度が急激に増加し始める時間までは、粒径が小さい程パルス速度が遅い傾向を示している。測定開始時における速度は骨材寸法0.15~0.3mmで約100m/sであり、10~20mmで約500m/sであった。ここでモルタルをペーストと骨材の2相体と考えて、次式によりモルタルの伝播速度を計算してみる。

$$\frac{1}{V_m} = \frac{\alpha}{V_a} + \frac{1-\alpha}{V_p} \quad (5.1)$$

ここで、 V_m : モルタルのパルス速度、 V_p : ペーストのパルス速度
 V_a : 骨材パルス速度、 α : 骨材の容積率

まず、ペーストのパルス速度は、分散系の一般式である(4・15)式に測定空気量の3.1%および0.6%を代入して計算すると約60m/sから250m/sとなる。次に骨材のパルス速度とペー

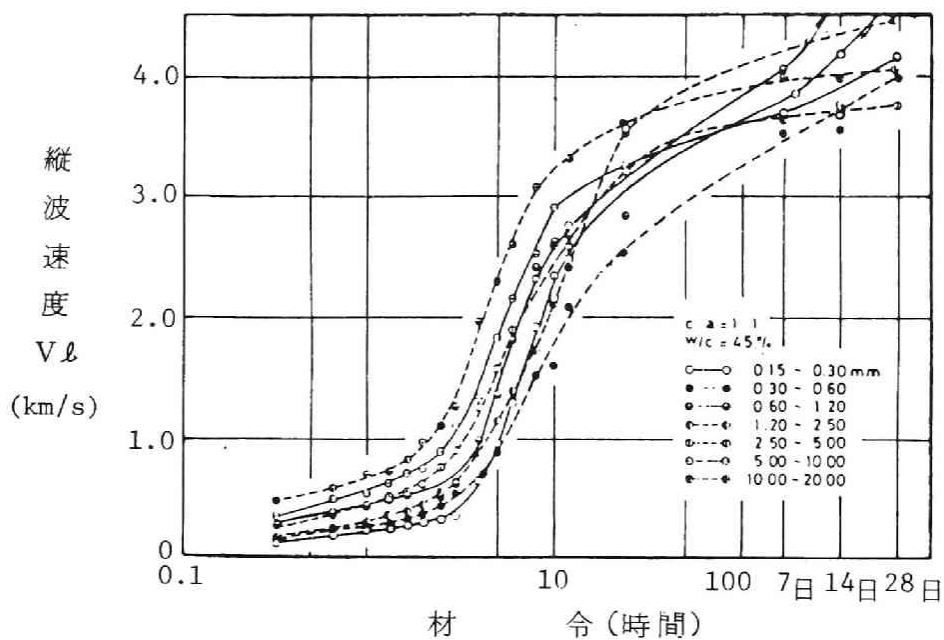


図 5.7 単一粒径モルタル縦波速度の経時変化

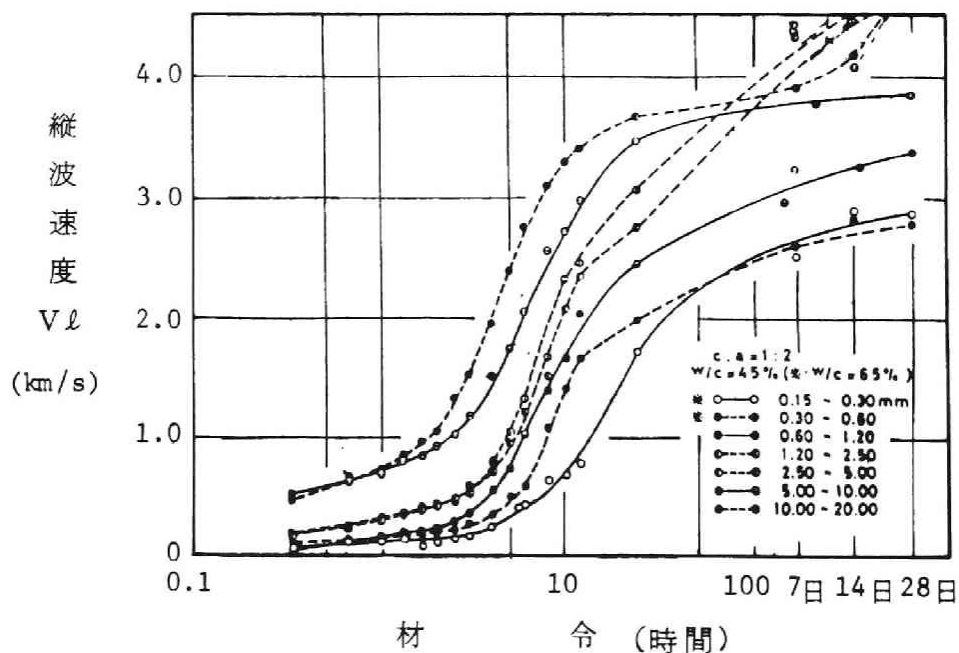


図 5.8 単一粒径モルタル縦波速度の経時変化

ストのパルス速度を(5・1)式に代入して計算すると約90m/s から360m/s となる。従って、ペースト中に空気が多く混入するほどモルタルの速度が低下する。すなわち、練り混ぜ条件が同一であれば、平均骨材径が細かい程空気が混入し易いということを考慮に入れると(5・1)式がある程度妥当式であるといえる。ところが、粒子が沈降して、骨格構造を形成していると考えられる5～6時間経過した段階においてもこの順位関係は続いており、粒径が何らかの形で関与していることは明らかである。Mitchell²⁹⁾は均一、均質で球状の砂が水で満されている場合の縦波伝播速度と砂の粒子径との関係について次の様に解いている。

型枠中に均一な球形の砂があるととして、球1が球2に球2が球3にというふうに衝突する時間を t_d としてニュートンの関係式から

$$\left. \begin{array}{l} \text{変位: } S = V_0 t + \frac{1}{2} a t^2 \\ \text{力: } F = Ma \end{array} \right\} \quad (5 \cdot 2)$$

ここに V_0 は粒子(球形)の初速度、 a は加速度、 M は粒子の質量、 t_d の間に生ずる変位を Δ とすると、 $V_0 = 0$ として

$$\Delta = \frac{1}{2} a t_d^2 \quad (5 \cdot 3)$$

であるから

$$t_d^2 = \frac{2\Delta}{a} \quad \text{および} \quad a = \frac{F}{M} = \frac{Fg}{W} \quad (5 \cdot 4)$$

ここで W は粒子の重量であり g は重力の加速度である。また粒子の密度を ρ 、粒子の直径を d とすると

$$W = \rho \frac{4}{3} \pi \left(\frac{d}{2}\right)^3 = \rho \frac{\pi d^3}{6} \quad (5 \cdot 5)$$

これを(5・4)式に代入して

$$a = \frac{Fg}{\frac{\rho \pi d^3}{6}} = \frac{6 Fg}{\rho \pi d^3} \quad (5 \cdot 6)$$

これを(5・4)式に代入

$$t_d^2 = 2\Delta \frac{\rho \pi d^3}{6 Fg} = \frac{\rho \pi \Delta d^3}{3 Fg} \quad (5 \cdot 7)$$

$$\therefore t_d = \sqrt{\frac{\rho \pi d^3 \Delta}{3 Fg}}$$

ここで $K^2 = \frac{\rho \pi \Delta}{3g}$ とおくと

$$t_d = K \sqrt{\frac{d^3}{F}} \quad (5 \cdot 8)$$

ここで F_0 を単位面積当りにかかる力, F を粒子 1 個にかかる力とすると

$$\text{近似的に} \quad F = \frac{F_0}{n^2} = \frac{F_0 d^2}{L^2} \quad (5 \cdot 9)$$

ここに n は粒子の個数で伝播距離 L とすると $n = L/d$

$$\therefore t_d = K \sqrt{\frac{d^3}{F_0 d^2}} = K \sqrt{\frac{L^2}{F_0}} d = K' \sqrt{d} \quad (5 \cdot 10)$$

ただし

$$K' = K \sqrt{\frac{L^2}{F_0}} = \frac{KL}{\sqrt{F_0}}$$

t_d は実際には液膜の厚さである。

以上より伝播速度 \bar{V} は砂の伝播速度 V_s として

$$\bar{V} = \frac{1}{\frac{1}{V_s} + \frac{t_d}{d}} = \frac{1}{\frac{1}{V_s} + \frac{K'}{\sqrt{d}}} \quad (5 \cdot 11)$$

となる。Mitchell は $K' = 0.000320$, $V_s = 13000 \text{ ft/s}$ として図 5.9 を与えている。

(5.11) 式あるいは図より明らかなように骨材粒子径が小さくなることによって, 伝播速度が低下することがわかる。

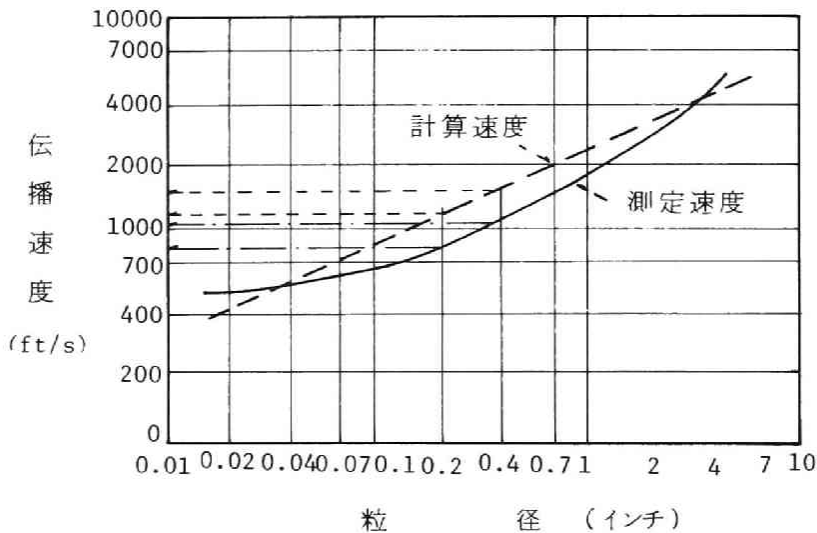


図 5.9 各粒径の湿潤状態の砂および砂利の伝播速度
(Mitchell による)²⁹⁾

また別の観点からこの点について考察してみる。Byfors³⁰⁾ は若材齢コンクリートを図 5.10 のように骨材, ペースト, 骨材とペーストとの境界に存在するインターフェース層の 3 相体と考え次式を得ている。

$$\frac{1}{v_0} = \frac{S_a}{S_0} \frac{1}{v_a} + \frac{S_p}{S_0} \frac{1}{v_p} + \frac{n_F}{S_0} \cdot t_F^0 \quad (5 \cdot 12)$$

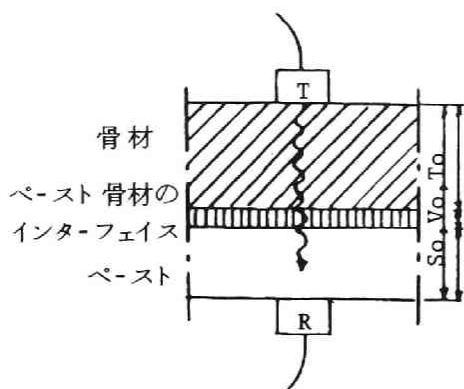


図 5.10 コンクリートの理想化モデル (Byfors)

ただし S_0 : 全伝播距離 S_a, S_p : 骨材, ペースト
の伝播距離 V_0 : 実測パルス速度 V_a, V_p : 骨材, ペースト
のパルス速度 n_F : インターフェー
スの数 t_F^0 : 個々のインター
フェースの伝播距
離

上式を変形して

$$\frac{1}{V_0} = V_a \frac{1}{V_a} + V_p \frac{1}{V_p} + \frac{n_F}{S_0} t_F^0 \quad (5 \cdot 13)$$

ただし V_a, V_p は骨材, ペーストの容積

Byfors は伝播速度はコンクリート組成から影響を受けるとし、骨材の種類、セメントペーストの量、インターフェース層について考慮しなければならないと述べている。特にインターフェース層については骨材の量、骨材粒径、空気量による影響が大きいとし、骨材量一定の時は骨材径を小さくするとインターフェース層が増加するとしている。彼は更に空気量についてのパルス速度への補正式は実験式として

$$\Delta V_{A0} = -0.05 (A_0 - 2) \quad (\text{km/s}) \quad (5 \cdot 14)$$

骨材の最大寸法への補正式は実験式として

$$\Delta v_{d \max} = -0.42 \ln \left(\frac{32}{d_{\max}} \right) \quad (\text{km/s}) \quad (5 \cdot 15)$$

を与えている。Mitchell の結果や Byfors の結果からも、骨材の粒径がパルス速度に影響することは明らかである。また Byfors の (5・13) 式において骨材量 V_a を増加させることは骨材のパルス速度がより影響することになるが、粒子径が小さくなればインターフェースの数を増すことになり速度の低下割合が著るしくなる。図 5.8 は図 5.7 に比べ細骨材量を 2 倍に増やした場合である。図中の 0.6mm 以下では水セメント比 45% で均等に練れなかったもので 65% としたので論外であるとする。空気量が 0.5~6.1% まで変化したことを考慮に入れても図 5・7 と比較すると、骨材径の大きなものは速度が増加している。これは骨材量の影響の方がインターフェース数の増加に対する影響よりも大きかったと考えられる。しかし骨材径の小さいものはインターフェース数の増加から速度が低下している。以上により粒径が小さくなることによって速度低下をするのはインターフェース数の増加によるものと考えて良いということが言える。

図 5.11 は連続粒径骨材を使用したモルタルの縦波速度を示したものである。骨材量を一定、水セメント比も一定とした場合、連続粒度の骨材では粗粒率の小さいものが、言い換えれば平均粒子径が小さいものほど、僅かにパルス速度は遅くなるが、骨材の最大寸法が一定であれば (5・15)

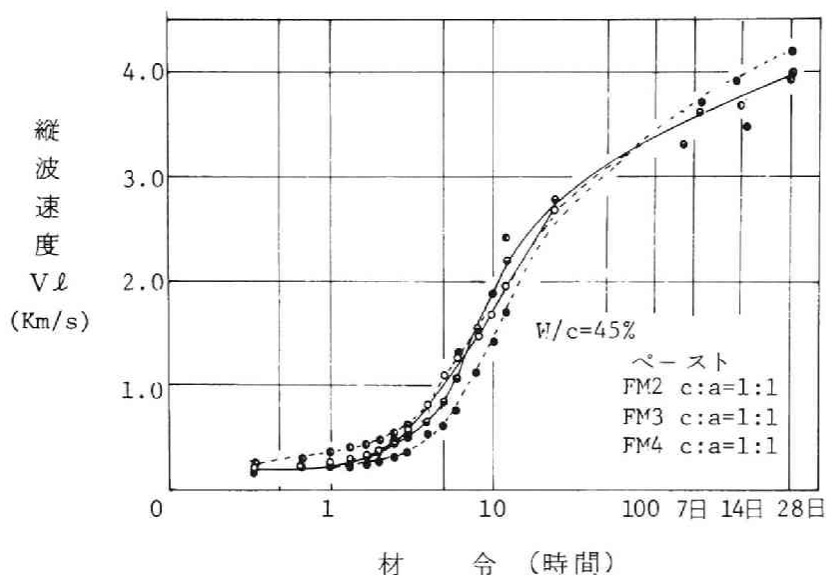
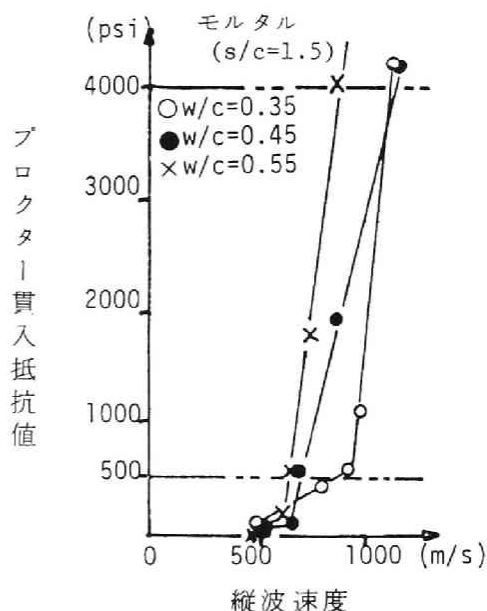


図 5.11 連続粒径モルタル縦波速度の経時変化

式から考えても、極端に粗いとか細かいとかいった特別な場合を除いて粗粒率は余り影響しないことが判明した。これは単一粒径モルタルの速度が平均化されたかたちで速度増加することであると思われる。次に速度と強度の関係を調べてみた。図 5.12 は砂セメント比を一定として水セメント比を変化させた場合のプロクターの貫入抵抗値と縦波速度の関係を表わしている。モルタルの貫入抵抗値は硬さの程度を表わしているものと思われる。図から、貫入抵抗値と縦波速度の関係は折れ線となっており、Ibrahim³¹⁾の圧縮強度とパルス速度の関係が折れ線になるという結果に類似している。図から判断してモルタルの速度は、極く初期に



5.12 プロクター 貫入抵抗値と縦波速度

おける材令では、貫入抵抗値は速度に敏感であるが、始発時刻以後では逆に鈍くなり、同一貫入抵抗値では水セメント比の違いによって速度も違うという結果になっている。従って貫入抵抗値と縦波速度の関係は明確にしにくいといえる。図 5.13 はモルタルの水セメント比を一定にして、砂セメント比を 0.5 から 2.0 まで変化させた場合の圧縮強度と縦波速度との関係について

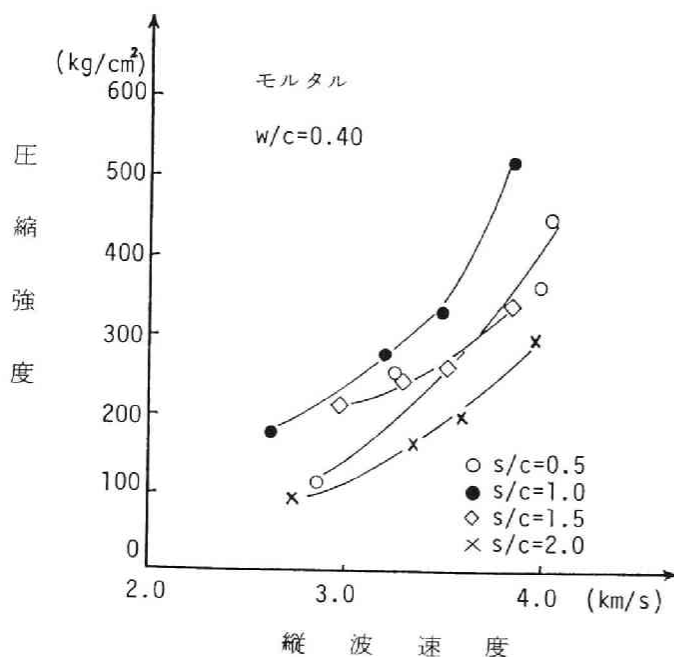


図 5.13 モルタルの圧縮強度と縦波速度

調べた結果である。図より圧縮強度が同一のモルタルについては骨材量が多くなると速度が増大する傾向を示しており Elverly³²⁾らのコンクリートについての結果と同じ結果となっている。この結果から、同一配合のモルタルでは縦波速度からの圧縮強度の推定は可能であるが、骨材量が違えば縦波速度と圧縮強度の関係も多少の違いが生じる。

コンクリートの縦波伝播速度の経時変化に関しては 4・2 においてすでに説明したので、

本節では骨材の条件を一定として水セメント比を45%、55%、65%のコンクリートについて練り混ぜ直後から材齢28日までの速度変化を測定し、圧縮強度との関係を中心に調べることにした。

実験の結果は図 5.14 に示されるように各配合とも 2～4 時間までパルス速度は徐々に増加し

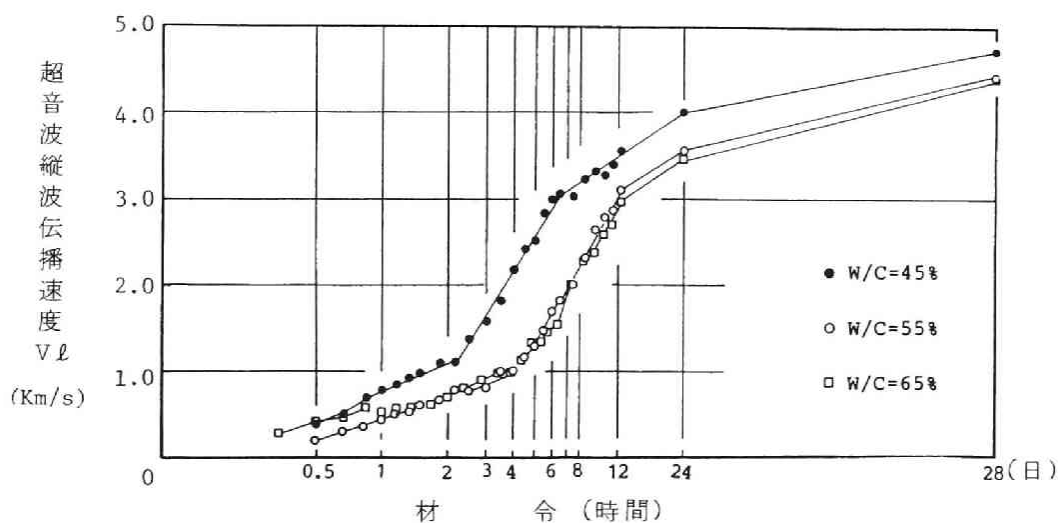


図 5.14 超音波縦波伝播速度 V_l の経時変化

1000 m/sec 前後に達した後、材齢12時間程度までに急速に増加し、その後材齢28日まで漸増する。この速度増加曲線はペーストやモルタルのそれと同様の傾向を示している。また水セメント比の違いについての影響は、4章において述べたように水セメント比が大きくなると差が出なくなることを表わしている。

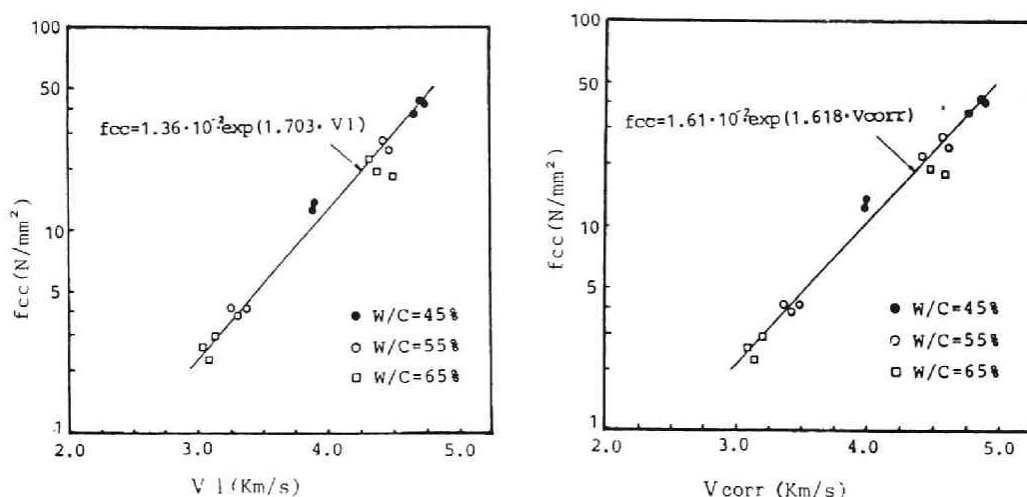


図 5.15 圧縮強度 f_{cc} と縦波伝播速度 V_l および補正伝播速度 (Byforsによる) V_{corr} の関係

次に圧縮強度と縦波伝播速度の関係について調べた結果を図 5.15 に示す。図中の縦軸は対数目盛をとっている。結果は図のようにバラツキの少ない直線となっており、実験式を求めてみると次式が得られた。

$$f_{cc} = 1.36 \times 10^{-2} \exp(1.703 \times V_l) \quad (\text{N/mm}^2) \quad (5 \cdot 16)$$

ここで V_l は縦波パルス速度 (km/sec) である。また Byfors の補正式について検討してみる。粗骨材の最大寸法は 20mm であるから 32mm に対して (5・15) 式、空気量に対して (5・14) 式で補正すると次式が得られた。

$$f_{cc} = 1.61 \times 10^{-2} \exp(1.618 \times V_{corr}) \quad (\text{N/mm}^2) \quad (5 \cdot 17)$$

ここで V_{corr} は補正したパルス速度である。(5・16) (5・17) 式を比較してみるとほとんど両式の間には差はない。例えば実測値が 3 km/s であったとして、空気量 2.5% とすると (5・16) 式からは 2.25 N/mm²、(5・17) 式からは (5・14, 15) 式を利用して、 V_{corr} は次式で求まるので

$$V_{corr} = V_l + 0.05 (A_0 - 2) + 0.42 \ln \left(\frac{32}{d_{max}} \right) \quad (5 \cdot 18)$$

$V_{corr} = 3.22$ km/s となるから f_{cc} は 2.95 N/mm² となり 0.70 N/mm² の差が生じる。配合が同一のものであれば (5・16) 式のように直接関係式を求めても良いが種々の配合、特に粗骨材の最大寸法が違う場合には (5・18) 式から修正パルス速度に変換して関係式を求めるのが良いであろう。今回は24時間のコンクリートと28日のコンクリートについて関係式を求めたが、12時間以内のコンクリートの圧縮強度をパルス速度から推定することは超音波パルス速度の測定値の変動係数が急に大きくなるので信頼性が低いという、Elvery³³⁾らの報告によって圧縮

強度を測定しなかったが、今後この点については研究の余地を残している。

(2) 横波伝播速度の経時変化

横波の測定は、横波振動子より出る縦波に影響され横波の立ち上りが特定しにくい問題があるが、本研究では図5.2の装置により縦波と横波を同時に発振させ、ブラウン管上で二つの波を同時観測することで横波の確認をしながら測定することにした。

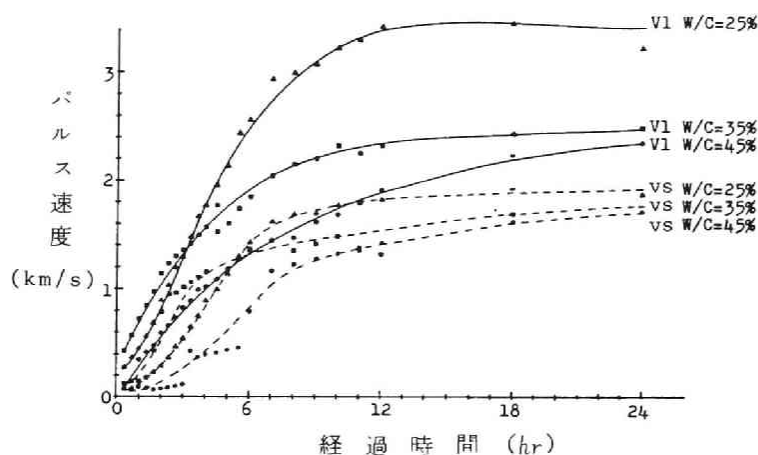


図5.16 ペーストの縦波速度と横波速度の経時変化

ペーストの速度増加曲線を図5.16に示す。図中には縦波速度と横波速度が載せてある。ペーストの横波速度は縦波速度と同様の増加傾向を示しており、水セメント比の違いについても縦波と同様の傾向となっている。

このことはセメント粒子どうしが沈降したり、吸着して、パルス波の伝達経路さえ確保されておれば、横波は十分ペースト中を透過することができ、また、水和物の析出によってセメント構造体がより強固になるにつれて、せん断弾性係数の増加から伝播速度も速くなることを表わしている。図5.17は横波速度と縦波速度の比の経時変化を水セメント比 $W/C = 25\%$ 、 35% 、 45% のペーストについて表わしたものである。水セメント比25%のペーストは注水後20分で0.218であったのが24時間で0.582となっている。図5.18は横波速度と縦波速度の比がポアソン比によってどの様に変化するかについて表わしたものであるが、材料が弾性体であれば、ポアソン比が小さくなるにつれて横波速度と縦波速度の比が大きくなることを示しており、フレッシュペーストの横ひずみと縦ひずみの比もポアソン比であると仮定して考えると、横波速度と縦波速度の比が0.218から0.582まで変化したということはポアソン比が経時的減少したと推察され、速度比によって凝結硬化の過程を観察できるものと考えられる。若材齢コンクリートのポアソン比に関する情報は極めて少ない。前述の42-CEA State of the art report ('81)のポアソン

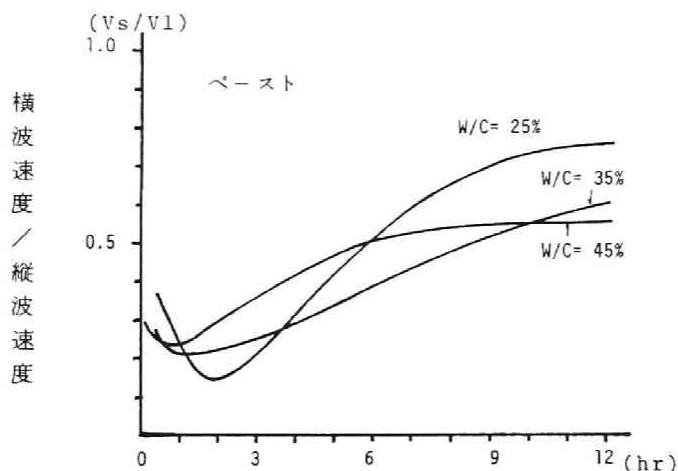


図 5.17 ペーストの横波速度 V_s と縦波速度 V_l の比

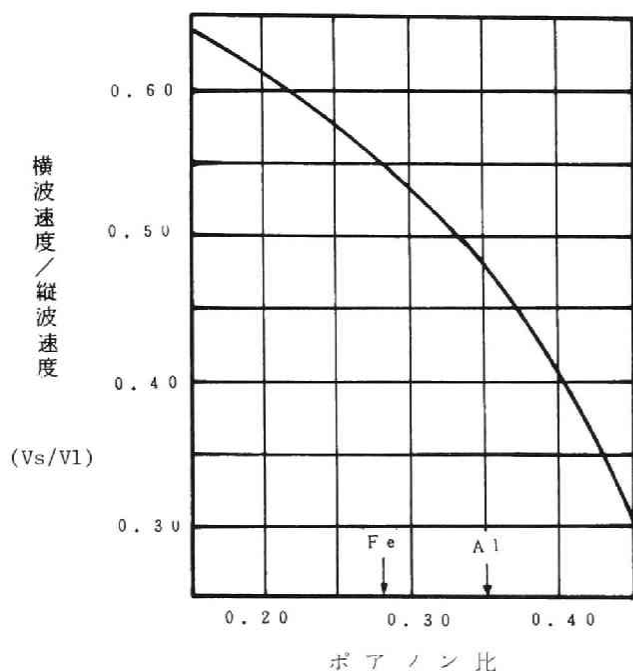


図 5.18 ポアソン比と音速の関係
(超音波探傷法 : 日刊工業新聞社刊, p. 5)

比の項においても Günzler, Plank, Byfors の 3 件がある程度であると述べられており、彼らの報告によると Günzler³⁴⁾ は 15 から 30 時間の間ではポアソン比と材齢との関係は明らかではないとしており、Plank は材齢 6 時間の間に 0.4 から 0.2 に変化すると述べており、Byfors はコンクリートの配合および養生温度を種々変化させポアソン比と圧縮強度の関係について材齢 3～4 時間から 28 日までの値についてまとめた結果、圧縮強度が約 1 N/mm^2 に達するまでは 0.5 程度から 0.15 程度まで急速に低下し、その後増加するという結果を得ている。

この問題についてはまだ十分な研究が行われていないので明言はできないが、ポアソン比は練り混ぜ直後は 0.4 ないしは 0.5 程度の値で、一旦 0.1 から 0.2 程度まで低下するがその後増加する傾向にある様子である。従って本研究で示されたような増加の傾向とは違う傾向になっている。

モルタルについては水セメント比を 45% と一定にして、砂セメント比を 1.0, 1.5, 2.0 にした場合の骨材量の影響について調べた結果が図 5.19 である。

縦波については、骨材量の増加によって12時間までは低い傾向を示しているのに対して、横波の場合は骨材量が多い程僅かに速くなる傾向にはあるがはっきりとした差ではない。ここでペースト同様に横波速度と縦波速度の比をとってみると図5.20のような材齢2時間付近において最小値を示し、その後増加する傾向にある。

コンクリートについてセメントと細骨材と粗骨材の重量比を1:1:1として水セメント比を45%, 55%, 65%に変化させた場合の横波速度の経時変化を図5.21に示す。速度の増加は3~5時間までは徐々に増加し、12~24時間まで急速に増加した後はゆるやかに増加する傾向を示している。

この急速に増加する時間は水セメント比が小さい程早くなり、またその勾配も急であることがわかる、このように水セメント比が小さい程早くな

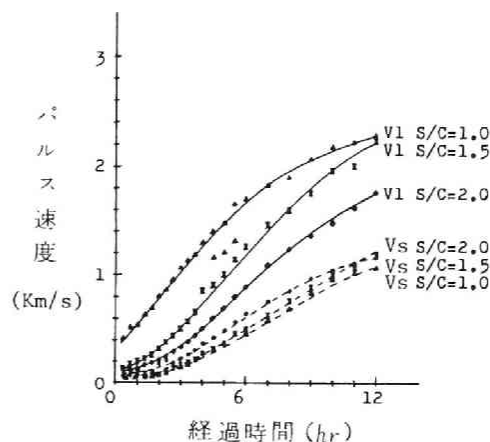


図5.19 モルタルの縦波速度 V_l および横波速度 V_s

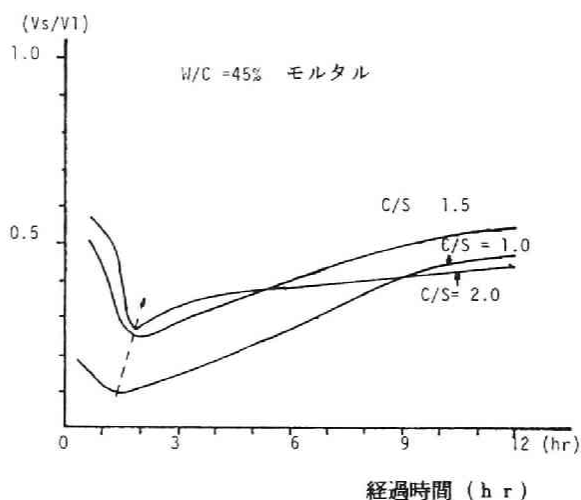


図5.20 モルタルの横波と縦波の伝播速度比 (V_s/V_l)

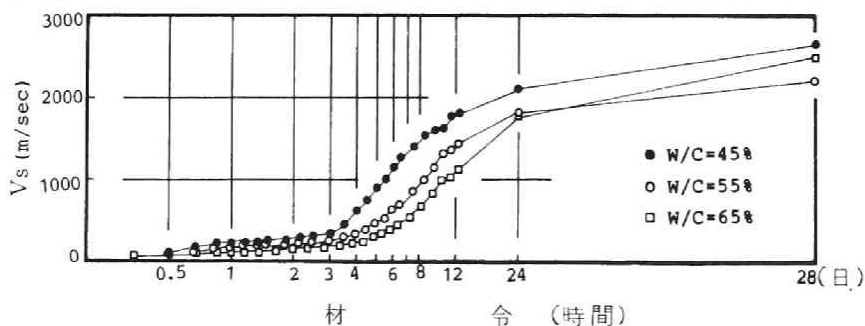


図5.21 超音波横波伝播速度 V_s の経時変化

る傾向は、セメント量の差による水和の影響が出ているものと考えられる。モルタルと同様に横波速度と縦波速度の比の経時変化を取ると図5.22のようになりモルタルと同様、材齢2時間付近において最小値を示し、その後増加する傾向を示した。以上の結果より、コンクリートは2時間程度から縦波の速度増加より横波の速度増加が上まわりポアソン比は徐々に減少し硬化する傾向にあることが推察される。

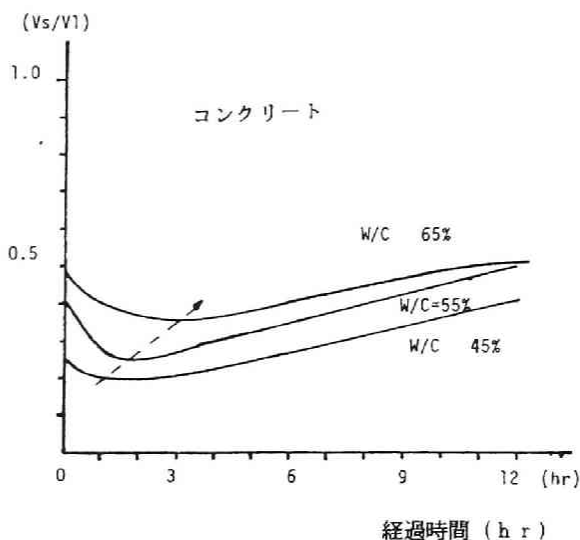


図 5.22 コンクリートの横波と縦波の伝播速度比 (V_s/V_l)

5・2・4 ま と め

ペースト、モルタル、コンクリートの縦波伝播速度と横波伝播速度の経時的変化に関する実験の結果をまとめると以下の知見が得られた。

- 1) セメントの水和の程度がペースト、モルタル、コンクリートの縦波伝播速度および横波伝播速度に影響を及ぼす。
- 2) 伝播速度は混入される骨材量や骨材の最大寸法に影響される。骨材量はペースト濃度が一定であれば多いほど若干の速度増加をもたらすが、骨材量を一定とした場合は粒径が小さい程、速度は遅くなる。また粒度は最大寸法が一定であればほとんど影響しない。
- 3) モルタルのプロクター貫入抵抗値と縦波伝播速度の関係は折れ線となる。即ち極く初期材齢において、速度は貫入抵抗値の増加に対して敏感に増加するが、始発時間以後は鈍くなる。また、この折れ線関係は水セメント比に影響され、同一貫入抵抗値での縦波速度はモルタルの水セメント比によって違う。
- 4) 初期材齢における圧縮強度と縦波伝播速度の関係は、指数式で表わすことができ、空気量・骨材の最大寸法を考慮した補正速度を用いることで、関係式の精度を向上させることができる。
- 5) 横波伝播速度と縦波伝播速度の比はペースト、モルタル、コンクリートのポアソン比と関係があると考えられ、凝結硬化過程における変形に関する性質の経時変化を知る上で良い指標となり得る可能性がある。

5・3 動的レオロジー定数の経時的変化

5・3・1 はじめに

コンクリートが練り混ぜられてから、経時的に音波パルスの速度が増加して変化することは、

コンクリートの有する力学的性質がセメントの水和に伴って増加して行くことを意味する。フレッシュコンクリートの性質が経時的に変化して行く様子を、物理量によって数値的に表現することは、コンクリート工事を施工する上で各作業工程の管理上重要である。本節においては第4章の4・3で用いられたフレッシュペースト、モルタル、コンクリートを粘弾性体と考え、動的レオロジー量としての動的弾性率、動的粘性率などの経時的変化に及ぼす配合要因の影響を実験的に調べ、従来の伝播速度の変化曲線からの判断とは異った観点からの考察を行なう。

5・3・2 実験方法

動的レオロジー定数は第4章の(4・51)式から(4・57)式で求まるフレッシュペースト、モルタル、コンクリートを粘弾性体と仮定した場合の動的弾性率 E' 、動的粘性率 η' 、ずり弾性率 G^* 、体積弾性率 K^* を採用している。すなわち縦波速度 V_l 、横波速度 V_s を実測することにより

$$\left. \begin{aligned} G^* &= \rho V_s^2 \\ K^* &= \rho V_l^2 - \frac{4}{3} G^* \end{aligned} \right\} \quad (5 \cdot 19)$$

また縦波速度 V_l と縦波の減衰係数 α および縦波の透過周波数 f_l から

$$\left. \begin{aligned} E' &= \rho V_l^2 \frac{1 - r^2}{[1 + r^2]^2} \\ \eta' &= \rho V_l^2 \frac{2r}{[1 + r^2]^2} \\ r &= \alpha V_l / \omega l, \quad \omega l = 2 \pi f l \end{aligned} \right\} \quad (5 \cdot 20)$$

横波についてのずり粘性率 η^* は横波速度 V_s 、横波の減衰係数 α' および横波の透過周波数 f_s から次式より求まる。

$$\left. \begin{aligned} \eta^* &= 2 \alpha' \rho \frac{V_s^3}{\omega_s^2} \\ \omega_s &= 2 \pi f_s \end{aligned} \right\} \quad (5 \cdot 21)$$

実験装置は第4章の4・3と同じでコンクリートについては図5.23の装置および型枠で行っている。また減衰係数 α は差による方法と、多重反射法によって求めることとした。

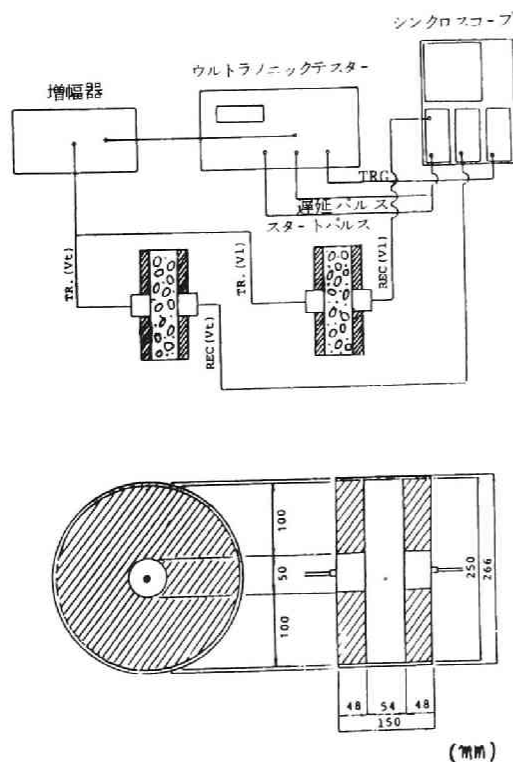


図 5.23 実験装置 (コンクリート用)

した結果である。実験は水セメント比30%, 40%, 50%のペーストを JIS R 5201のモルタルミキサーにより3分間練り混ぜ、速やかに型枠に詰め、1, 2, 5, 10, 20 KHzの5種類の周波数により縦波特性を測定した。測定は練り混ぜ直後(0分)と60分経過後の2回行った。動的弾性率 E' は、周波数の増加により高い値を示し、その値は 10^7 dyn/cm^2 のオーダーから 10^8 dyn/cm^2 のオーダーまで変化している。また、材齢0分と60分を比較すると60分後の方が高い値になっている。水セメント比についてみると、0分と60分に顕著な差は認められないが、水セメント比30%ペーストでは0分の値が少し小さいことを示している。一般的に、水セメント比の小さいものの方が弾性率が小さいということは考えられず、このペーストが比較的硬練りのため受振子の振動面にペーストが十分回り込まず、振動面とペーストの境界に空隙ができ、速度が遅くなったことによるものと考えられる。しかし水和が進めば音波は空隙を迂回してくる方が速くなり60分後には40%や50%のペーストの動的弾性率に追いついている。

動的粘性率 η' は動的弾性率とはまったく逆の傾向を示し、周波数が高くなるほど急激に低下している。その値は大略に $10^3 \text{ dyn}\cdot\text{sec/cm}^2$ から $10^2 \text{ dyn}\cdot\text{sec/cm}^2$ まで変化している。また、0分より60分の方が高い値を示した。水セメント比の違いによる影響は、0分では余り差は認められなかったが、60分では水セメント比の大きなもののほど下降の割合が緩やかである傾向にあった。

ここで動的粘性率と動的弾性率の比を遅延時間($\tau = \eta' / E'$)として計算してみると図5.26のような結果が得られた。遅延時間は、周波数の増加に伴ってほぼ直線的に低下しており、今回の実験範囲では水セメント比による有意な差は認められなかった。遅延時間は実験のタイムスケールを表わすもので、低周波数ではより粘性的に、高周波数ではより弾性的にペーストが挙動することを示している。

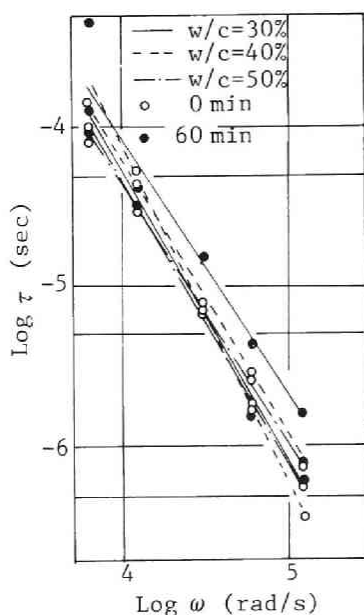


図 5.26 セメントペーストの遅延時間
($\tau = \eta' / E'$)

切換スイッチ2による方法は、減衰係数が直接測定できるということに本法の特徴があるが粒子の沈降による受振子の下面部分(振動面)とペーストとの分離で界面に水がたまったり、長時間の測定ができないことや上述の理由により凝結、硬化時間までの測定には適した方法とは言えない。そこで切換スイッチ1の多重反射法で測定してみることにした。多重反射法によれば、上記の問題はかなり解消できるはずである。今回の実験では pulse generator として periodic-oscillator (特注品)を用いているが、パルス数を1波から5波まで発生させ波形観察の結果、パルス数が多くなると反射波が重なるなどの理由などから、この時期のペーストにはパルス数は1波のみとするのが適当であると判断して実験を行った。ここでは、速度を測定した後、波形を写真撮影し、スライドによって第1波の音圧(I_1)と伝播時間の1.5倍の位置にある第2波の音圧(I_2)

を記録し、発受振子間距離 x として、減衰係数 α を

$$\alpha = \frac{\log e I_1 I_2}{x} \quad (5 \cdot 22)$$

により求め、(5・20) 式より E' 、 η' を計算した。

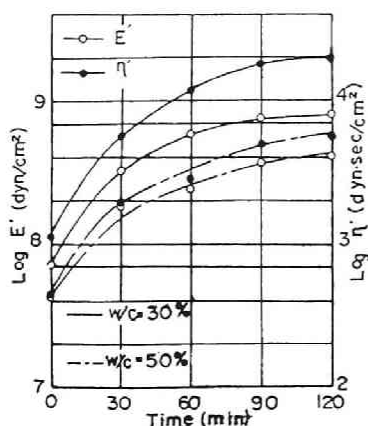


図 5.27 セメントペーストの動的弾性率 E' および動的粘性率 η' の経時変化 (透過してきた周波数で計算)

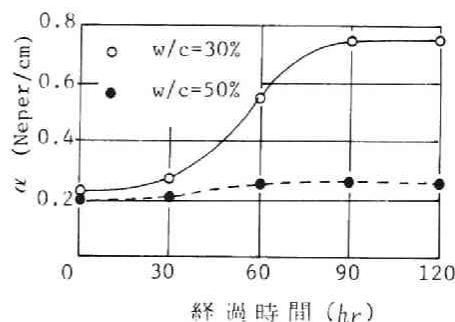


図 5.28 セメントペーストの減衰係数 α の経時変化

また測定時間は4時間程度経過すると側面や底面からの反射波が第1波と第2波の間に干渉して第2波の波形に影響するので、3時間までとした。この方法による経時変化を図5.27に示す。図は水セメント比30%と50%のペーストについて各々の時間における2時間までの透過しやすい周波数についての E' と η' を計算したものである。動的弾性率は時間の経過と共に増加しており、60分位まで急激に増加する。その値は 10^7 dyn/cm^2 のオーダーから 10^8 dyn/cm^2 のオーダーまで変化する。水セメント比が30%のペーストの方が50%より大きな値を示しており、値の増加率も大きいことが解る。この時の減衰係数を示したのが図5.28である。水セメント比30%のペーストは30分位までは0.2程度であったのが90分まで急激に増加し、0.75程度になり120分まで変化がなかった。これに対して50%のペーストは30分から60分の間で少し増加するもののほとんど変化しなかった。このことはペーストの凝結が始れば水和物の析出による表面積の増加から粘性が増加し、減衰係数は急激に増加するものと推察される。また(5・20)式において η' は α の影響が大きいのから、30%のペーストの方が50%ペーストの動的粘性率の増加率を上まわったものと思われる。

図5.29はペーストの動的弾性率 E' の周波数特性の経時変化を表わしたものである。実験は水セメント比を30%、40%、50%とし、30分間隔で3時間 ($W/C=50\%$ は4時間) まで測定した。動的弾性率 E' は高分子系物質の粘弾性的挙動と同様に縦座標のとりうる値が著しく広範囲にわたり、0.5~10KHzの狭い周波数域においても数けたにわたって変化している。また、そ

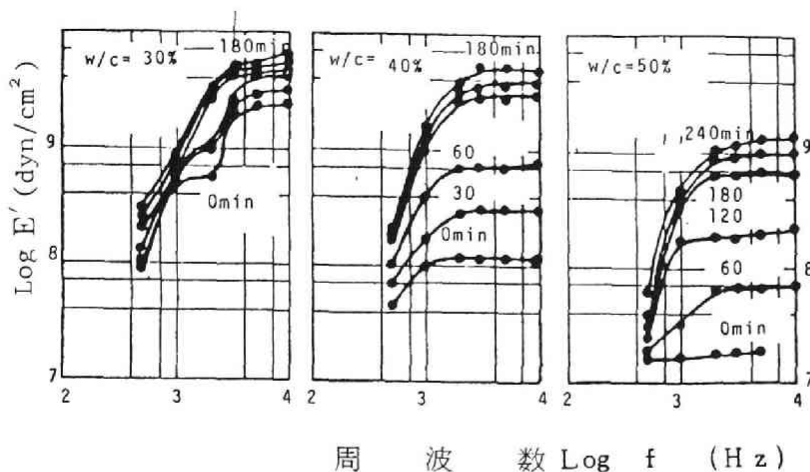


図 5.29 セメントペーストの周波数依存性
(動的弾性率 E')

の傾向は時間の経過とともに著しく表われている。ペーストは、0.5 KHz から 3 KHz の間で急激に増加し平衡状態になる。このことは低い周波数においてはセメントゲルの擬平衡状態 (3 章の図 3・14 の $G'(\omega)$)

曲線の左側平坦部

分を指し、ゲルの網目の緻密さの程度をあらわす)を表す。また、高い周波数では固体状の特性を表わしている。その中間の転移領域を表している。したがって 0.5 KHz のような低い周波数での動的弾性率の値はゲルの状態が密であるか粗であるかの判断の指標となる。例えば水セメント比 50% と 30% のペーストでは動的弾性率の値は約 1 けた違うことから 30% の方がより密なゲル構造を有していると判断できる。また高い周波数における固体状挙動領域での値は、ペーストのこわばりあるいは硬さの程度を示すものと考えられるので、凝結などのこわばりを示す良い指標となる。例えば練り混ぜ直後のペーストの値を比較すると、水セメント比 30% で 10^9 dyn/cm^2 、40% で 10^8 dyn/cm^2 、50% で 10^7 dyn/cm^2 付近と 1 けたずつ違っておりかなり明確である。経時変化について考えると、各周波数における値は時間とともに増加している。また水セメント比の大きなものほどその増加割合が大きい。この周波数特性曲線の形状と縦軸の値との位置関係は重要な意味を持つ。例えば、水セメント比 30% のペーストの材齢 30 分のゲル構造に似た構造になるには 40% のペーストでは 150 分かかるし、50% のペーストでは 4 時間以上かかるということになる。

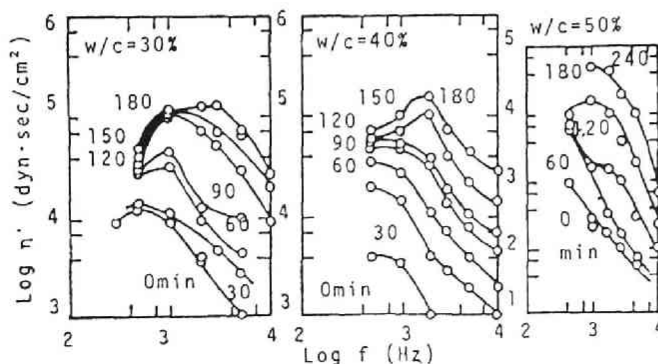


図 5.30 セメントペースト周波数依存性 (動的粘性率 η')

また擬平衡領域から固体状領域への転移速度勾配は時間とともに急になっておりセメントゲル間の連結が剛になっていく過程を表わしている。

動的粘性率 η' についての結果を図 5・30 に示す。動的粘性率は高い周波数では単調に低下する。しかし低い周波数では η'

は定常流粘度 η に近づくはずで、ペースト粘度（みかけ粘度）は $10^{-1} \sim 10^2$ dyn \cdot sec/cm² 程度と考えられるからである。 η' に関する周波数特性曲線のピーク値は練り混ぜ直後においては0.5KHz付近にあるが時間の経過とともに数KHzのところへ移動する。動的粘性率は動的弾性率と同様に、水セメント比の大きいもの程低い値を示し、配合の影響を良く表わしている。

(2) モルタルの周波数特性

ペーストに骨材が混入することにより動的レオロジー定数の周波数特性がどのような影響を受けるのかを調べることはコンクリートの品質管理上非常に有意義である。

本研究では多重反射法によって行う関係で、伝播距離をあまり長くとれないのでモルタルによって実験した。モルタルの水セメント比を一定とし ($W/C=40\%$)、骨材量をセメント重量との比（セメント骨材比= C/S ）で $1/1$, $1/1.5$, $1/2.0$ とした。セメントは市販の普通ポルトランドセメント、細骨材は比重 2.54, F.M.=3.81 の川砂を用いている。実験はペーストと同様に行っている。

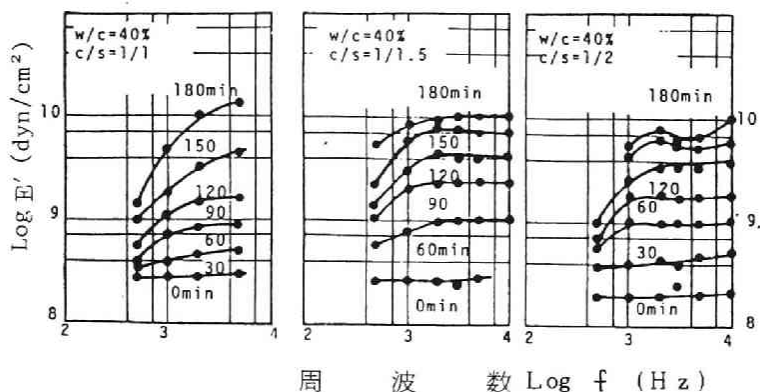


図 5.31 モルタルの周波数依存性（動的弾性率 E' ）

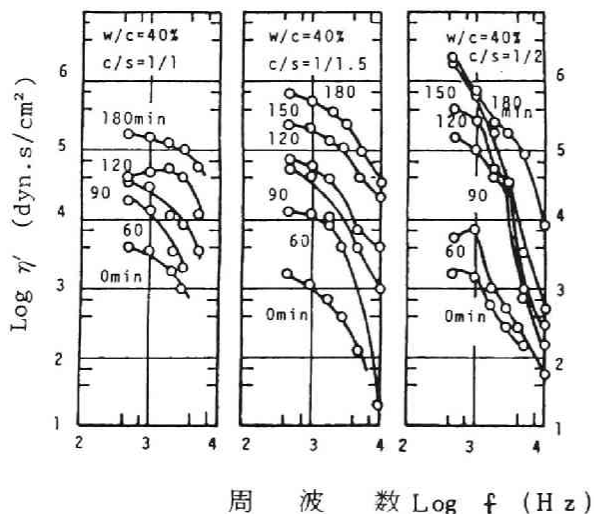


図 5.32 モルタルの周波数依存性（動的粘性率 η' ）

図 5.31 はモルタルの動的弾性率 E' の周波数特性を調べた結果である。 $C/S=1/1$ のように骨材量が少ない場合はペーストと同様の傾向を示すが、それより多くなるとすぐに固体状領域に入る。これは骨材量の増加により骨材粒子が充填し、ペーストの周波数特性が系全体として影響しないためであろう。したがって周波数にあまり関係なく時間とともに増加している。

図 5.32 は動的粘性率 η' の周波数特性について調べた結果である。

動的弾性率が周波数にあまり依存しなかったのに反し、動的粘性率はペーストと同様に単調に低下する。ペーストの時に表われたピーク値は本研究において測定出来た周波数の範囲内では存在しなかった。しかし、非常に低い周波数においては定常流粘度に近づくはずで、モルタルの定常流粘度（みかけ粘度）は $1 \sim 10^3 \text{ dyn} \cdot \text{sec} / \text{cm}^2$ の範囲にあるので、0.5KHz以下のところにピーク値が存在すると考えられる。したがってモルタルにも力学的異常分散周波数が存在するものと思われる。動的粘性率は時間とともに増加する。特に低い周波数においては、骨材量の多いもの程2時間以後は大きくなる。以上によりモルタルの骨材量の増加による周波数特性は、動的弾性率よりむしろ動的粘性率に強く表われることが判明した。

(3) ペーストのずり弾性率および体積弾性率の経時変化

横波と縦波の速度が同時に測定できれば（5・19）式により、ずり弾性率 G^* 、体積弾性率 K^* が簡単に得られてペーストの物性変化がすぐに判定でき、有効な手段となる。この考えによる研究は佐治らによって行われているだけであまり例をみない。本研究では図5・2に示す装置によってペースト、モルタル、図5・23に示す装置でコンクリートの横波および縦波の速度を同時測定した。振動子は縦波についても横波についても $\phi 50\text{mm}$ 50KHz用チタン酸バリウム系振動子を用いている。なお横波用に伝播距離に差のある型枠を2つ用いているのは（5・21）式によってずり粘性率 η^* を求める場合の横波の減衰係数を求めるためである。

図5.33は水セメント比25%、35%、45%のペーストのずり弾性率の経時変化を両対数目盛でとったものである。ずり弾性率は材齢1時間から10時間位の範囲で急激に増加している。値としては 10^7 dyn/cm^2 から 10^{10} dyn/cm^2 のオーダーの間で変化しており、この値は溶融石英棒を使用した超音波の反射係数からずり弾性率を求めた Stepisniks⁴⁰⁾らの結果とも一致している。ここで水セメント比35%ペーストを例にとってみると、50分、3時間、10時間付近に折点があり、これらの点がこの配合のペーストの物性が変化する点であると考えられる。プロクターの貫入抵抗値試験を行って貫入抵抗値を求めたのが図5.34である。ペーストの貫入抵抗値もモルタルと同様に500psi 付近より急激に増加しており、ペーストについてもこれを始発とする。500psiにおけるずり弾性率は水セメント比が違っていても表5.3のように 10^9 dyn/cm^2 のオーダーである。したがってペーストのずり弾性率が 10^9 dyn/cm^2 のオーダーに達する時間がペースト

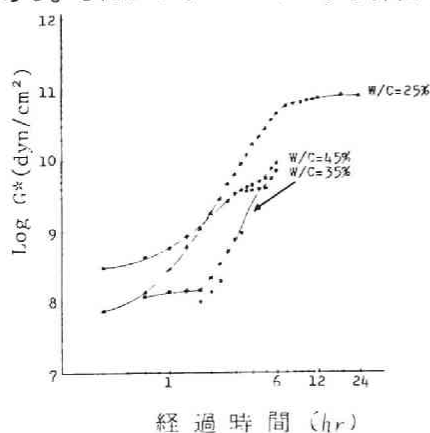


図 5.33 ペーストのずり弾性率 G^* の経時変化

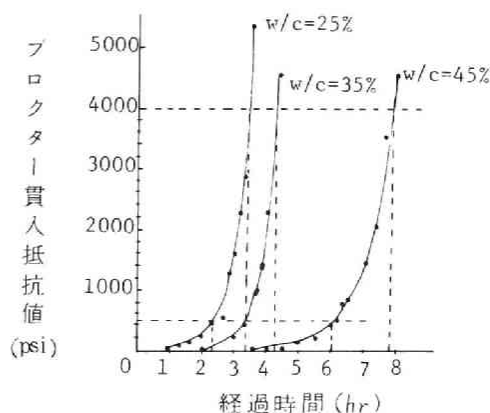


図 5.34 ペーストのプロクター貫入抵抗値

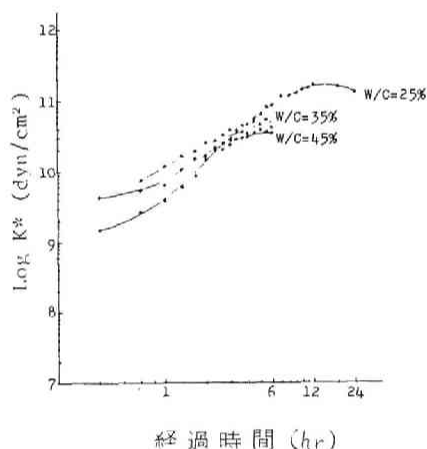
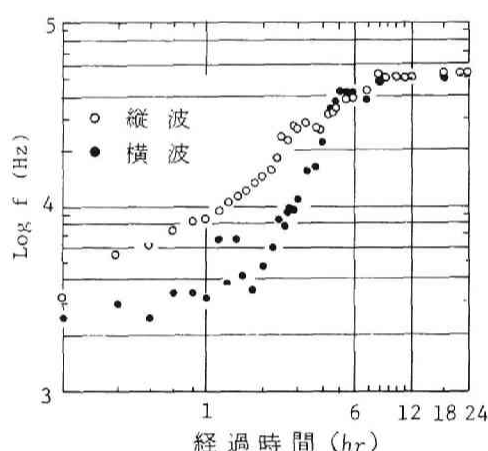
表 5.3 貫入抵抗値500psi におけるペーストのずり弾性率 G^*

水セメント比 %	500psiでの材令 (時 : 分)	ずり弾性率 G^* (dyn/cm ²)
25	2:20	2.8×10^9
35	3:20	2.3×10^9
45	6:00	9.0×10^9

表 5.4 貫入抵抗値4000psi におけるペーストの体積弾性率 K^*

水セメント比 W/c	4000psiでの材令 (時 : 分)	体積弾性率 K^* (dyn/cm ²)
25 %	3:20	3.4×10^{10}
35 %	4:15	3.3×10^{10}

の始発時間と考えて良いであろう。体積弾性率についての実験結果を図5.35に示す。数値的には材齢24時間までで 10^9 dyn/cm² から 10^{11} dyn/cm² のオーダーまで変化することがわかった。動的弾性率に比べ比較的緩やかに増加している。ここで、プロクターの貫入

図 5.35 ペーストの体積弾性率 K^* の経時変化図 5.36 透過周波数の経時変化
(W/C=35%ペースト)

抵抗値が4000psi に達した時間をペーストにおいても終結時間であるとし、この時の体積弾性率をとったのが表5.4である。それによると、体積弾性率は 3.0×10^{10} dyn/cm² 付近に集中することがわかる。

体積弾性率は初期においてずり弾性率と2桁ちがうので縦波速度にはあまり影響しないが、10時間以後には1桁まで追いつき、縦波速度に影響し始めるので縦波速度を $V_L \div (K^*/\rho)^{1/2}$ とするのは注意を要する。

図5.36は水セメント比35%のペーストの透過周波数である。振動子は50KHz用を使用しているが、50KHzが透過するのは材齢7時間以後になることを示している。このように材齢によって透過しやすい周波数域が存在するというのは Hillger⁽⁴¹⁾ によっても述べられており、遅延時間が経時的に変化することがその原因である。遅延時間は実験のタイムスケールを決定する役割

をしており、透過周波数の経時変化も若材齢の試料の物性変化を観察する指標となると考えられる。

(5) モルタル、コンクリートのずり弾性率および体積弾性率の経時変化

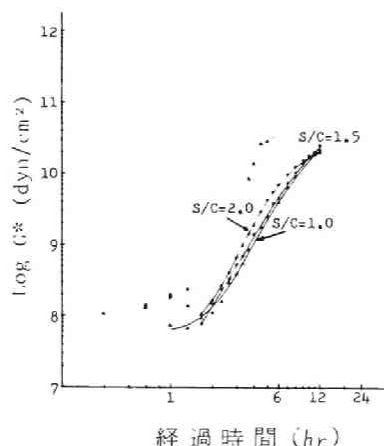


図 5.37 モルタルのずり弾性率 G^* の経時変化 ($W/C=45\%$)

水セメント比を一定の45%として砂セメント比を1.0, 1.5, 2.0とした場合のずり弾性率を図5.37に示す。数値的には 10^7 dyn/cm^2 から12時間で 10^{10} dyn/cm^2 まで変化している。骨材量の増加によるずり弾性率への影響は少ない。プロクター貫入抵抗値が500psiを示す時間のずり弾性率は水セメント比が一定の場合、砂セメント比が1.0から2.0の範囲では $3.0 \times 10^9 \text{ dyn/cm}^2$ 付近の値であることがわかった。(表5.5)

モルタル実験の体積弾性率の結果を図5.38に示す。体積弾性率は 10^8 dyn/cm^2 のオーダーから 10^{10} dyn/cm^2 の範囲で変化している。骨材量の影響は砂セメント比が2.0のように多い場合は練り混ぜ直

表 5.5 貫入抵抗値 500psi におけるモルタルのずり弾性率 G^* ($W/C=45\%$)

砂セメント比 s/c	500psiでの材令 (時 : 分)	ずり弾性率 G^* (dyn/cm^2)
1.0	4:40	2.9×10^9
1.5	4:40	2.1×10^9
2.0	4:40	3.8×10^9

後から 10^9 dyn/cm^2 のオーダーにあり1.5, 1.0の場合に比べて高い値にあるが、その後の増加割合は他のものに比べて緩やかである。いま、砂セメント比2.0と1.5について体積弾性率の増加変化率を比較したものを図5.39に示す。

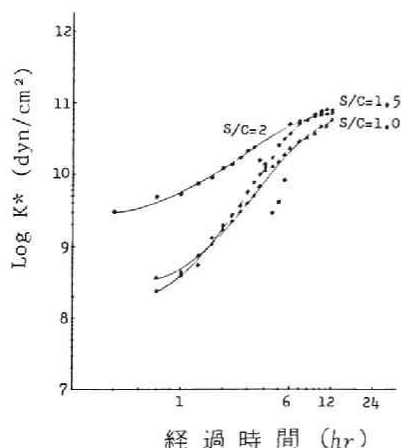


図 5.38 モルタルの体積弾性率 K^* の経時変化 ($W/C=45\%$)

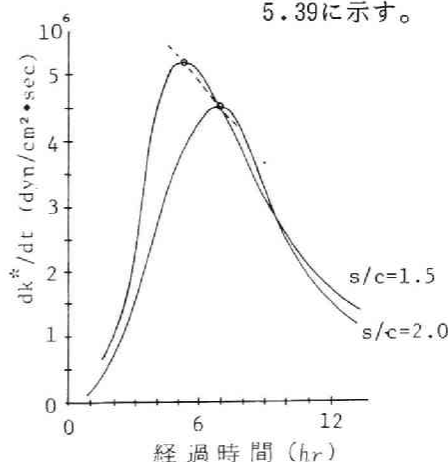


図 5.39 モルタルの体積弾性率の増加変化率 dK^*/dt ($W/C=45\%$)

それによると、変化率のピーク値は1.5で材齢5時間付近、2.0で7時間付近にあり、そのピーク値は1.5の方が大きいことを示しており、体積弾性率の増加傾向が違ってくる。これは骨材量がある程度大きくなると、ペーストの弾性がある程度以上になるまで骨材骨格構造の影響が支配的になるためと考えられる。体積弾性率は最終的には材齢12時間で各配合とも同一の値に収束することを表わしている。

表 5.6 貫入抵抗値 4000psi における
モルタルの体積弾性率 K^*

砂セメント比 s/c	4000psiでの材令 (時 : 分)	動的弾性率 K^* (dyn/cm ²)
1.0	6:00	6.2×10^{10}
1.5	6:50	6.2×10^{10}
2.0	7:00	6.0×10^{10}

ここでプロクター貫入抵抗値が 4000psi に達した時の体積弾性率を求めたのが表 5.6 である。体積弾性率が骨材セメント比に関係なく 6.0×10^{10} dyn

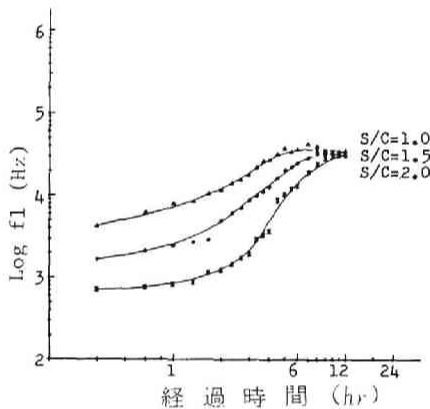


図 5.40 モルタルの透過周波数 f_l の経時変化 (縦波)

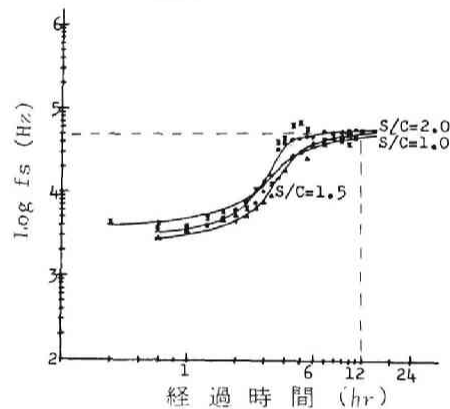


図 5.41 モルタルの透過周波数 f_s の経時変化 (横波)

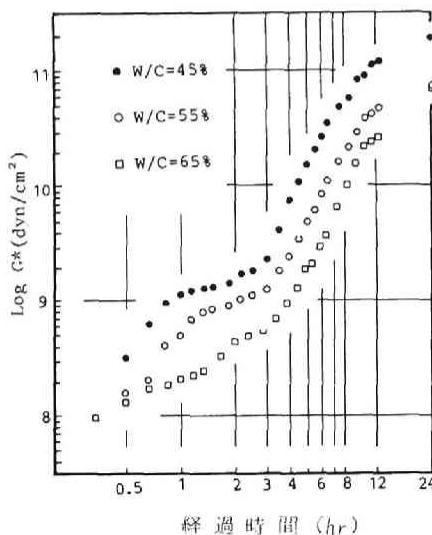


図 5.42 コンクリートのずり弾性率 G^* の経時変化

/cm² に集中している。ペーストと比較してモルタルの方が大きな値となっている。

透過周波数は図 5.40, 図 5.41 に示されるように骨材セメント比の違いが縦波に明確に表われている。即ち骨材量が多いほど透過周波数は低く、2～3時間頃から10時間にかけて急速に増加し、差がなくなる。横波は骨材セメント比に関係なく、2時間から5時間の間に急速な増加をしており、骨材量の差はほとんどみられない。

コンクリート (表 5.2 の配合) のずり弾性率の経時変化についての実験結果を図 5.42 に示す。コンクリートのずり弾性率は、練

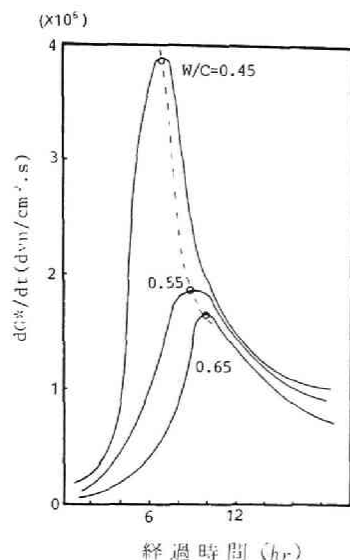


図 5.43 コンクリートのずり弾性率の増加変化率 (dG^*/dt)

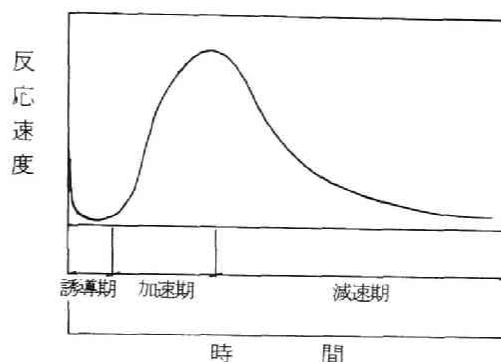


図 5.44 セメントの水和反応速度曲線

り混ぜ直後においては 10^8 dyn/cm^2 のオーダーであるが、24時間で 10^{11} dyn/cm^2 付近まで変化する。

また水セメント比の違いが明確に出ており、水セメント比の小さい配合ではずり弾性率が大きい結果となっている。

これはペーストの結果およびモルタルの結果から推察して、ずり弾性率がペーストの性質に影響されるものであると考えられる。図5.43はずり弾性率の増加変化率を示したものであるが、水セメント比が曲線の形状、ピーク値、ピーク発生時間に影響することがわかる。この曲線の形状はセメントの水和速度曲線（図5.44）と類似しており⁴²⁾、コンクリートの凝結硬化過程をよく表わしている。また図5.42において、コンクリートについてもペーストモルタルと同様の折点が認められる。すなわち、1時間、3時間、12時間付近に折点が存在する。ずり弾性率がこわばりの一部を表わすものであると考えるならば、これらの折点のうち特に急激な変化を開始する第2折点はコンクリートの始発時間に対応するものと推察される。ここで5mm ふるいでウェットスクリーニングしたモルタルについてプロクターの貫入抵抗値を調べてみた。プロクター貫入抵抗値が 500psi になる材齢でのずり弾性率は、表5.7のように $1.4 \times 10^{10} \sim 2.9 \times 10^{10} \text{ dyn/cm}^2$ のほぼ一定の値を示した。これに対して表5.8に示されるように 4000psi になる材齢でのずり弾性率は 1.45×10^{10} から $7.72 \times 10^{10} \text{ dyn/cm}^2$ の範囲に大きくばらついていること

表 5.7 貫入抵抗値 500psi におけるずり弾性率と材齢の関係

水セメント比	材令 (500psi時)	ずり弾性率 G^* (dyn/cm^2)
45%	6:00	2.90×10^{10}
55%	7:50	2.00×10^{10}
65%	9:20	1.41×10^{10}

表 5.8 プロクター貫入抵抗値 4000psi におけるずり弾性率と材齢の関係

水セメント比	材令 (4000psi時)	ずり弾性率 G^* (dyn/cm^2)
45%	9:15	7.72×10^{10}
55%	12:00	4.10×10^{10}
65%	12:50	1.45×10^{10}

から、ずり弾性率が始発時間に比較的關係があると考えられる。またずり弾性率の増加変化率のピーク時におけるプロクター貫入抵抗値は 750~900psi の間にあり、両者に密接な関係があることを表わしている。(表 5・9)

表 5・9 ずり弾性率の経時変化率のピーク時におけるプロクター貫入抵抗値と材齢の関係

水セメント比	材令 (ピーク時)	プロクター貫入抵抗値 (psi)
45%	6:50	900
55%	9:00	900
65%	10:00	750

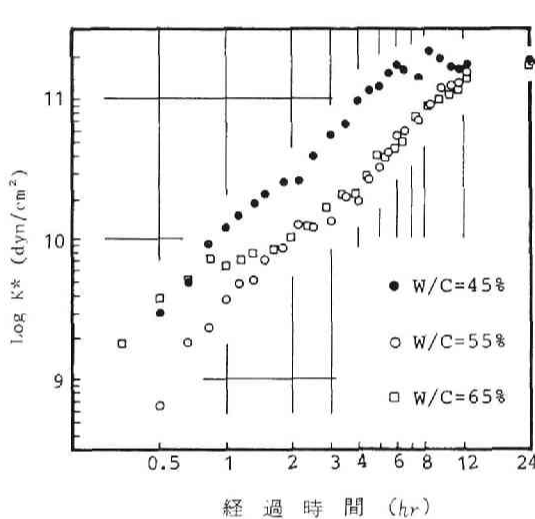


図 5.45 コンクリートの体積弾性率 K^* の経時変化

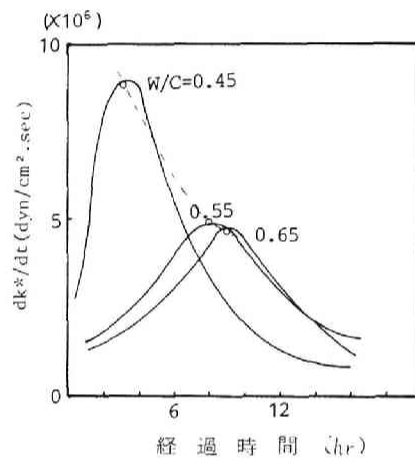


図 5.46 コンクリートの体積弾性率の増加変化率 (dK^*/dt)

コンクリートの体積弾性率は図 5.45 に示すように、ずり弾性率のような練り混ぜ後数時間内に見られる明瞭な折点は認められないが、各配合とも 1 時間付近と 8~12 時間付近に比較的に明瞭な折点のある経時変化をする。数値としては 10^9 dyn/cm^2 のオーダーから 10^{11} dyn/cm^2 のオーダーまで増加する。その増加変化率をとってみると図 5.46 のようになり、配合の違いが増加変化率に影響することがわかる。図において水セメント比が大きくなるとピーク値の発生時間が遅れ、またピーク値も低下する。このピーク値の発生時間と、そのときのウェットスクリーニングモルタルのプロクター貫入抵抗値との間には表 5.10 のように相関関係は明確ではない。こ

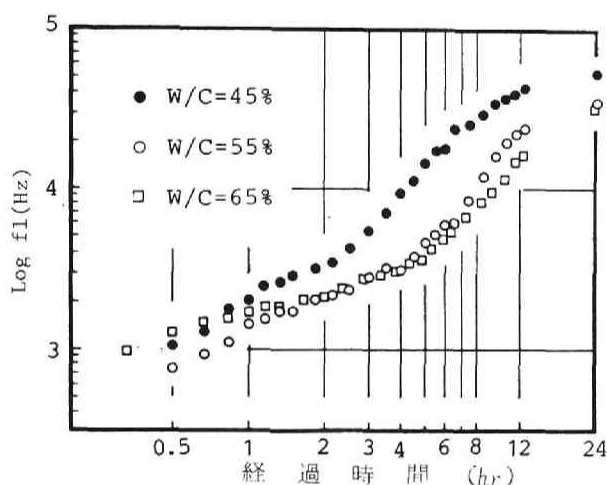
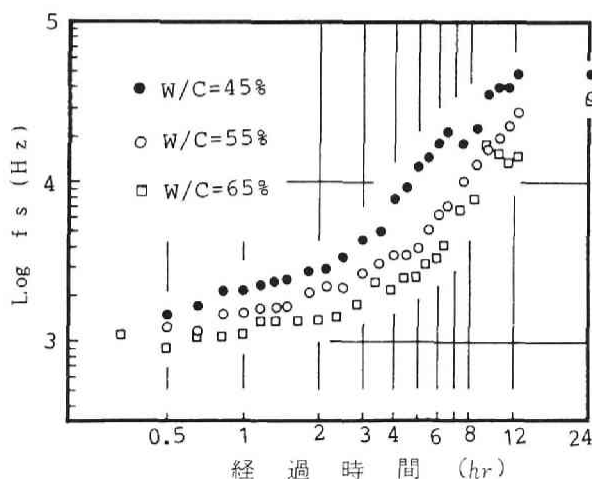
表 5.10 体積弾性率のピーク時におけるプロクター貫入抵抗値と材令の関係

水セメント比	材令 (ピーク時)	プロクター貫入抵抗値 (psi)
45%	3:30	***測定出来ず
55%	8:00	600
65%	9:00	425

表 5.11 プロクター貫入抵抗値 4000psi における体積弾性率と材齢の関係

水セメント比	材令 (4000psi時)	体積弾性率 E^* (dyn/cm ²)
45%	9:15	1.94×10^{11}
55%	12:00	1.37×10^{11}
65%	12:50	1.37×10^{11}

ここでウェットスクリーニングモルタルの貫入抵抗値 4000psi と体積弾性率との関係について調べてみると表 5.11 のように $1.37 \sim 1.94 \times 10^{11}$ dyn/cm² になっている。ペースト、モルタル、

図 5.47 縦波の透過周波数 f_l の経時変化 (コンクリート)図 5.48 横波の透過周波数 f_s の経時変化 (コンクリート)

ウェットスクリーニングモルタルと比較すると約 3×10^{10} dyn/cm², 約 6×10^{10} dyn/cm², 約 14×10^{10} dyn/cm² と増加しており, 終結時間をプロクター貫入抵抗値のみで定義することは必ずしも適切でない。

コンクリートを通過する縦波および横波の透過周波数の経時変化を図 5.47, 図 5.48 に示す。コンクリートの透過周波数はペーストやモルタルと同様 1 KHz 程度から材齢 24 時間で数十 KHz まで変化している。また練り混ぜてから 2~3 時間まではゆるやかに増加するが, それ以後 12 時間位に急速に高い周波数が透過するようになり, 振動子の共振周波数に近づく。このことはコンクリート試料中を透過する波の周期が短くなることを示しており, その時間における遅延時間又は緩和時間 (粘性率/弾性率) と関係すると考えられるので実験タイムスケールが短くなる。即ち弾性成分がより勝ってくることを示している。

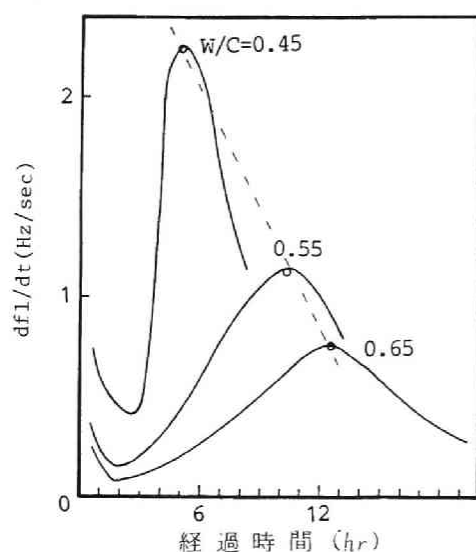
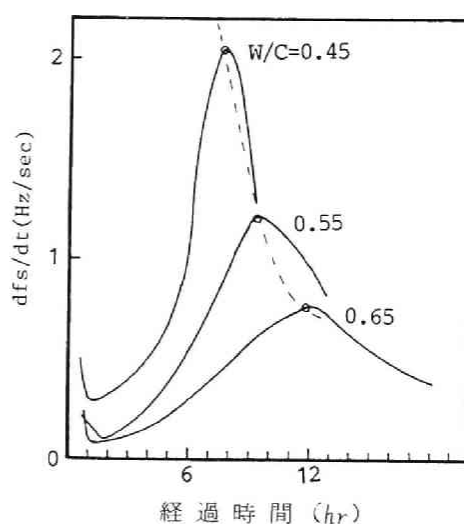
ここでコンクリートのこわばりの一部を表わす, ずり弾性率と横波透過周波数との関係について調

表 5.12 各横波周波数が透過する材齢（時間：分）とずり弾性率（コンクリート）

水セメント比	2000Hz		5000Hz	
	材令	ずり弾性率 G^* (dyn/cm ²)	材令	ずり弾性率 G^* (dyn/cm ²)
45%	0:50	9.44×10^8	3:20	3.76×10^9
55%	2:30	1.03×10^9	5:00	5.79×10^9
65%	3:40	1.06×10^9	6:50	5.31×10^9

水セメント比	10000Hz		20000Hz	
	材令	ずり弾性率 G^* (dyn/cm ²)	材令	ずり弾性率 G^* (dyn/cm ²)
45%	5:00	1.63×10^{10}	7:00	4.10×10^{10}
55%	7:30	1.78×10^{10}	10:30	3.35×10^{10}
65%	10:00	1.83×10^{10}	14:30	3.76×10^{10}

べた結果が表 5.12 である。表では 2 KHz, 5 KHz, 10 KHz, 20 KHz の各周波数に達した時の材齢とずり弾性率が示されている。表から各周波数に達するずり弾性率が水セメント比に関係なくほぼ同一の値になることがわかった。このことから、ずり弾性率は横波の透過周波数と関係がありコンクリートの凝結過程を横波の透過周波数で観察することが可能であると思われる。ここで縦波および横波の透過周波数の増加変化率をとってみると図 5.49, 図 5.50 のようになり、速度・ずり弾性率・体積弾性率の増加変化率と配合の関係を比較するとより一層明確に水セメント比の違いが表われている。更に曲線の形状は水和反応速度曲線と類似した形状を呈し、最小値が明確に表われている。この最小値がずり弾性率や体積弾性率の材齢初期における折点に対応するものと考えられる。

図 5.49 縦波の透過周波数の変化率 (df_L/dt)図 5.50 横波の透過周波数の増加変化率 (df_s/dt)

5・3・4 ま と め

ペースト、モルタル、コンクリートの動的レオロジー定数の経時変化についての実験結果をまとめると以下の結論が得られた。

- 1) 初期材齢におけるペーストの物性を伝播速度のみで判定することは、伝播速度が空気量に強く影響されることから適当でなく、減衰特性から動的レオロジー定数を求め検討するのが有効である。
- 2) セメントペーストは周波数依存性を有し、粘弾性特性は経時的に変化する。セメントペーストのゲル構造の生成の程度を調べるには、0.5KHz位の低い周波数、こわばりの程度を調べる場合には10KHz以上の高い周波数を用いるのが良い。動的粘性率は周波数が高くなるにつれて単調低下する。
- 3) モルタルもペーストと同様に周波数依存性を有する。動的弾性率は水セメント比一定とした場合、骨材量によってほとんど影響されないが、動的粘性率は周波数の増加に対して単調低下し、骨材量の多い方が経時的増加が著しい。
- 4) 縦波および横波を同時測定することによって得られるずり弾性率および体積弾性率は経時的に増加して行き、若材齢のペースト、モルタル、コンクリートの水和作用の進展による物性変化を非破壊的に評価する指標となる。

ずり弾性率、体積弾性率と時間の関係を両対数グラフにプロットすると、何点かの変曲点が表われるが、この変曲点はセメントの水和反応に関係した物性の変化点と考えられる。

- 5) コンクリートの凝結試験に用いられるプロクター貫入抵抗値の始発時間はずり弾性率、終結時間は体積弾性率が一定の値に達した時間に相当する。また、これらのレオロジー定数の増加変化率をとった場合、セメントの水和反応曲線と類似した曲線となりセメントの水和とこれらの値に深い関係があることが推察される。またこの曲線のピーク値は水セメント比によって影響を受ける。
- 6) 透過周波数の増加変化率は 5) における増加変化率よりも水セメント比の違いによる凝結過程を明らかにする。また、この透過周波数の増加変化率曲線における最小値がずり弾性率、体積弾性率の経時変化における初期の変曲点と関係する。

5・4 超音波パルス法による流動化モルタルの性質の経時的変化の測定

5・4・1 はじめに

コンクリート工事における施工の省力化を図るために、土木用の硬練りコンクリートに高分散性の高性能減水剤を添加し、一時的に流動性を良くして施工性を向上させようという流動化コンクリート工法が近年相当普及してきた。この流動化コンクリートはスランプロスが大きいとか添加量によっては粘稠なコンクリートになったり、材料分離が起きやすいとか、一般のコンクリートに比べて品質管理が難しく、それだけに品質管理方法としての従来のコンシステンシーメータでは十分にその性質を捕えることは困難である。本節では超音波パルス法により流動化モルタルの凝結硬化過程を測定し、本方法の流動化コンクリートへの適用性を検討することとした。

5・4・2 実験方法

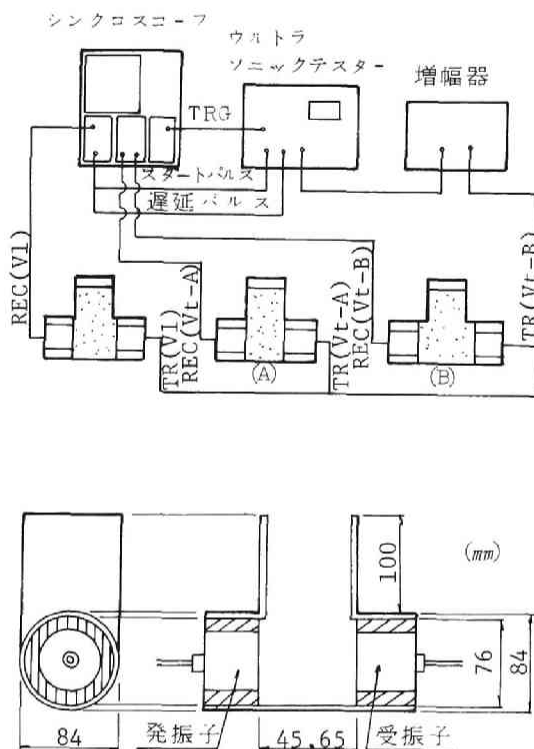


図 5.51 実験装置図および型枠詳細図

1) 実験装置

実験には図 5.51 に示す装置を用いた。縦波の測定にはジルコン酸鉛チタン酸バリウム系 (PZT 系) 50 KHz 用縦波振動子 ($\phi 50\text{mm}$)、横波の測定には PZT 系 50 KHz 用横波振動子 ($\phi 50\text{mm}$) を 2 組使用した。

型枠は内径 76mm のプラスチック円筒を図のように逆 T 型に工作したもので、発受振子は発泡スチロール製側壁の中央に設置した。横波については、ずり粘性率を求める関係で減衰係数を差による方法で測定するため伝播距離を 2 種類にしてある。この方法の特徴は縦波用 1 個と横波用 2 個の合計 3 個の振動子を同時に振動させるところにある。

2) 使用材料および配合

セメントは普通ポルトランドセメント (日本社製)、骨材は豊浦産標準砂を用いた。流動化剤としてはナフタリン系 (一部メラミン系使用) のものを使用した。

配合要因および水準は表 5.13 に示すように、ペーストについては水セメント比 25% と一定にして流動化剤の添加量を変化させた場合、モルタルについては砂セメント比を 2.0 と一定にして添加量を変化させた場合のそれぞれの影響について調べることにした。

3) 実験手順

試料の練り混ぜはアイリッヒ型ミキサーにより 2 分間練り混ぜ後流動化剤を添加し 3 分間の練り混ぜを行った。練り上った試料は速やかに型枠に詰め、詰め終わった時間を測定開始時間とした。また同時に空気量測定用、プロクター貫入抵抗試験用、圧縮試験用の試料を採取した。練り上り

表 5.13 流動化ペーストおよび流動化モルタルの配合表

	W/C (%)	砂セメント比	流動化剤の添加量 (セメント重量に対する百分率)
ペースト	25		0.25, 0.50, 1.00, 1.50
モルタル	45	2.0	0.25, 0.50, 1.00, 1.50

温度は $20 \pm 3^\circ\text{C}$ に調整している。

圧縮強度試験は $\phi 5 \times 10\text{cm}$ の円柱供試体を用い、材齢 3, 6, 12, 24時間において、4本ずつ圧縮試験を行った。

4) 解析方法

縦波速度 (V_l) および横波速度 (V_s) の測定は振動子間の距離および伝播時間によって計算した。また物性値の経時変化の指標としては体積弾性率 (K^*)、ずり弾性率 (G^*) およびずり粘性率 (η^*) を考え、次式により求めた。

$$\left. \begin{aligned} K^* &= \rho V_l^2 - \left(\frac{4}{3}\right) G^* \\ G^* &= \rho V_t^2 \\ \eta^* &= \alpha' \rho V_t^3 / (2 \pi^2 f_s^2) \end{aligned} \right\} \quad (5 \cdot 23)$$

ここで ρ は密度、 α' は横波の減衰係数、 f_s は横波の透過周波数である。

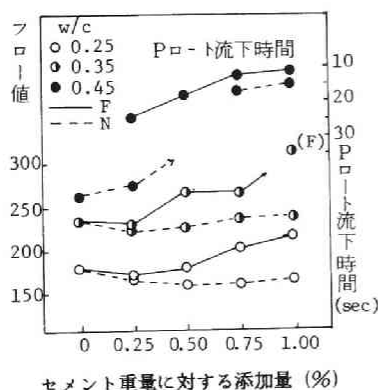


図 5.52 流動化剤の添加量フロー値または P ロート流下時間の関係 (温度 20°C)

5・4・3 実験結果および考察

1) 伝播速度におよぼす添加量の影響

ペーストの濃度と流動性の間に何らかの関係があるか調べるために、一般的な方法としてフロー試験を行った。水セメント比が3種類のペーストに流動化剤の添加量を徐々に増加させた場合のフロー値（フロー値の測定出来ない場合はPロートの流下時間を測定）の関係を示したのが図 5.52 である。図中の記号 F はナフタリン系、N はメラミン系の流動化剤を表す。この実験では同時添加法を採用している。実験結果からペーストの水セメント比が大きくなるに連れて剤の効きが良くなる傾向を示

しており、また剤の種類によっても効果は多少違うが添加量が多くなるにつれて流動性が良くなるという一般的傾向を示している。

ペーストの縦波速度と流動化剤の添加量の関係について一時間毎に3時間まで測定した結果を図 5.53 に示す。プレーンペーストについては水セメント比25%のものは型枠に均等に詰めにくかったこともあって練り混ぜ直後の場合、低い値を示しているが1時間から2時間の間に急激な増加があり、2時間以後は水セメント比と速度の

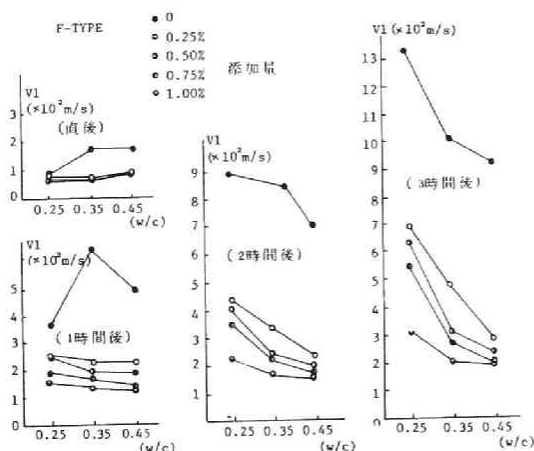


図 5.53 流動ペーストの縦波伝播速度の1時間毎の変化 (温度 20°C)

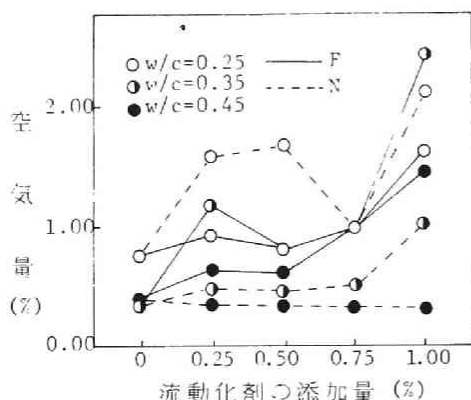


図 5.54 流動化剤の添加量と空気量
(F: ナフタリン系, N: メラミン系)

関係がはっきりしてくる。これに対し
て流動化ペーストは練り混ぜ直後の速
度が水セメント比、添加量とは関係な
くほぼ一定の値を示している。これは
流動化ペーストがセメント粒子が水に
十分に分散させられた状態にあり、4
章で述べられたようにこの場合縦波速
度は空気量によってほぼ決まること
になる。この時の空気量は図 5.54 の
ように速度に影響を及ぼす程の範囲で
はないのでこのような結果となったと考
えられる。表 5.14 は (4.9) ~

表 5.14 流動化ペーストの縦波伝播速度と添加量
(V_0 : 計算値, V_1, V_2, V_3 は練り混ぜ直後, 10 分後, 20 分後の速度, ρ は密度)

F-TYPE

添加量	air (%)	ρ	V_0 (m/s)	V_1 (m/s)	V_2 (m/s)	V_3 (m/s)
0.25%	0.76	2.19	92.7	83.8	110.7	145.5
	1.09	2.18	77.6	83.8	134.0	168.0
	0.91	2.19	84.8	76.0	93.9	118.8
0.50%	0.83	2.19	88.8	92.9	159.9	186.4
	0.70	2.19	96.6	74.1	116.9	155.0
	0.91	2.19	84.8	69.2	123.8	155.0
0.75%	0.97	2.18	82.2	59.6	105.2	130.8
	1.36	2.18	69.5	52.1	64.0	81.7
	0.97	2.18	82.2	68.5	112.4	140.2
1.00%	1.67	2.17	62.9	78.2	90.1	107.6
	1.28	2.18	71.7	82.9	123.5	135.0
	1.94	2.16	58.4	84.6	101.2	122.2

(4.11) 式で求めた計算値と実測値とを比較したものであるが、練り混ぜ直後の速度はほぼ計算値に近い値になっている。しかし 10 分後にはすでに計算値よりも相当大きくなっているものもあり、20 分後には全部大きくなっている。このように分散系の速度式が適用できるのが練り混ぜ静置されてから 10 分程度であるのは、水和によるものと、沈降による粒子の接触点数の増加によるものであると考えられる。ただし、この接触点は流動化剤によって粒子間力が弱められているので外力によって簡単に外れるものであろう。図 5.53 において 1 時間の静置により添加量の差が表われてきている。すなわち、分散効果の差の影響が速度に表われている。ペーストの速度は

その後急速に増加するが、添加量の少ないもののほど水セメント比の差がはっきりしてくる時間が早いことがわかる。3時間程度でペーストの配合と添加量の関係が明らかになる。

セメント粒子の沈降により接触点が増加するにつれてペーストの構造が形成されて行く。それと同時に弾性的性質も増加して行く。セメントペーストの流動特性はビンガム流動に近似するとされているが、この場合の降伏値がこの時期のずり弾性率に関係すると考えると速度と降伏値の間に何らかの関係が存在すると考えられる。そこでモルタルのフロー試験をペーストについて行ない、フロー値と縦波速度の関係を調べてみた。

フロー値は円錐台形の試料に鉛直方向の衝撃エネルギーが加わった時のせん断抵抗と考えることもできるので、降伏値、ずり弾性率と関係すると思われる。図5.55はペーストのフロー値と縦波速度の関係を一時間毎に測定した結果である。練り混ぜ直後のペーストのフロー値と速度の関係にはほとんど有意な差が見られないが、時間の経過とともにフロー値の小さいものは速度が速くなるという傾向を示すようになる。特に3時間

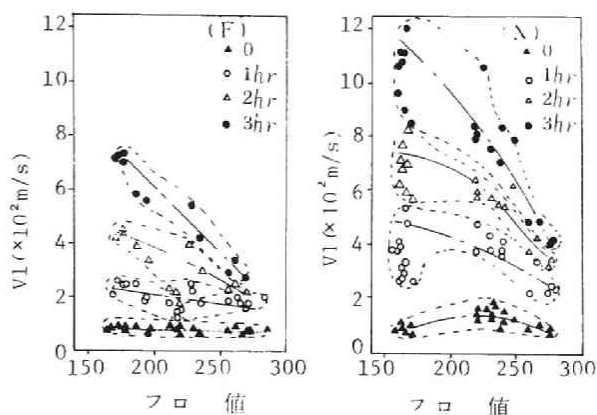


図 5.55 フロー値と縦波伝播速度 V_l の関係

ではこの傾向がはっきりしている。また流動化剤の種類により、速度増加割合が違っていることもわかる。しかし図から明らかなように測定値は大変ばらついており、配合の判定や物性の判定に用いる指標となりにくい。この原因は音波パルスとフローテーブルの衝突エネルギーの大きさや測定方法の違いによるものであろう。

次にペーストの材齢12時間（1部24時間まで測定）までの縦波および横波の速度の経時変化を

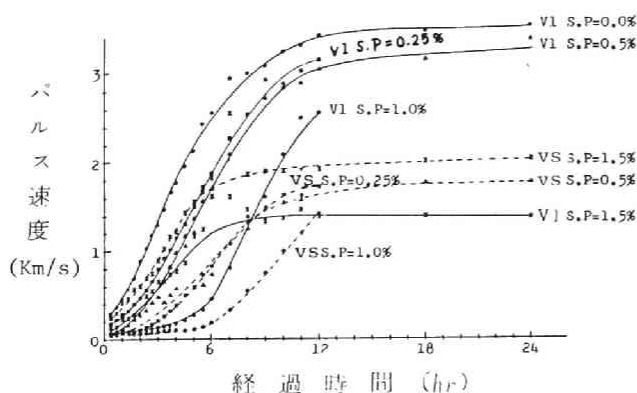


図 5.56 流動化ペーストの縦波速度 V_l および横波速度 V_s の経時変化 ($W/C=25\%$)

水セメント比25%について、添加量の影響を調べてみた。図5.56は縦波および横波を同時測定した結果である。図において縦波速度も横波速度も添加量が1%までは添加量が多くなるにつれて速度が急激に増加する時間が遅れており、凝結時間が添加量によって遅れて

行くことを表わしている。しかし1.5%になると分離傾向のため粒子の沈降による接触点が増え

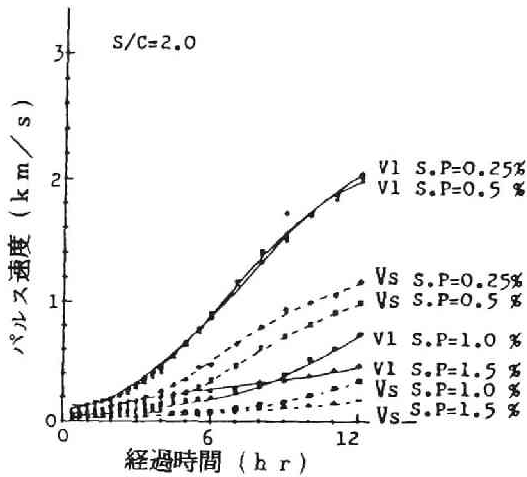


図 5.57 流動化モルタルの縦波速度及び横波速度の経時変化 ($W/C=45\%$, $S/C=2.0$)

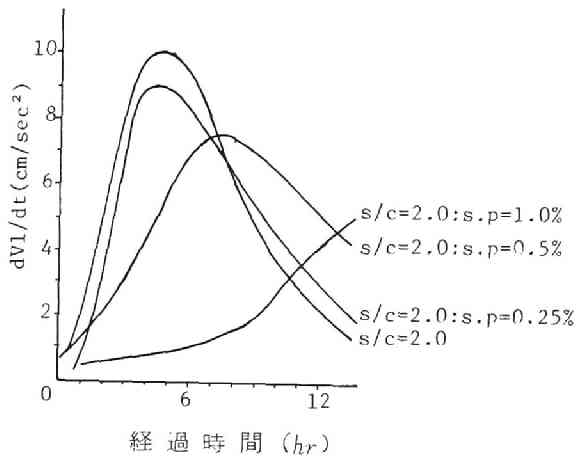


図 5.58 流動化モルタルの縦波速度増加変化率 (dVl/dt)

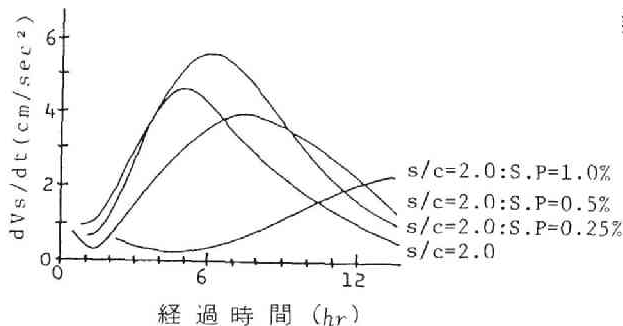


図 5.59 流動化モルタルの横波速度増加変化率 (dVs/dt)

て1.0%よりも早く速度の急速に増加する時間が表われている。従ってペーストに関してはこの方法では材料分離が起らない範囲では添加量が多くなると速度の急激に増加する時間が遅れるが、材料分離が起ってしまうと速度は速くなる結果となった。

モルタルについては、砂セメント比2.0、水セメント比45%と一定にして流動化剤の添加量を変化させた場合についての実験を行った。結果を図5.57に示す。モルタルの場合はペーストほど添加量の差は明瞭ではないが、添加量が0.5%と1.0%のところで縦波速度も横波速度も材齢3時間付近から差がついてきている。このことはモルタルに関しては1%以上添加しないと凝結遅延効果が表われないということを示している。

2) 速度増加変化率

縦波速度および横波速度の速度増加変化率を図5.57のモルタル実験結果より計算してプロットしたのが図5.58、図5.59である。速度増加変化率曲線の形状は前節において述べたように、セメントの反応速度曲線に類似している。これは縦波につ

いても横波についても同様のことがいえる。縦波に関してはコンクリートがこのような形状を示し、その曲線のピーク時における速度が1~2 km/sec⁴⁴⁾であるという Casson⁴⁴⁾らの報告がある。本研究において、モ

ルタルの縦波速度増加変化率曲線のピーク時での縦波速度は図 5.57 と図 5.58 を対比させてみると判かるが、ほぼ 1 km/sec にあるという結果が得られた。横波の速度増加変化率に関する報告はペーストがこのような曲線形状を示すことを松藤ら⁴⁵⁾が報告しているだけである。図 5.59 において横波のピーク時における速度を図 5.57 と対比させてみると、ほぼ 500 m/sec 付近に集中していることがわかる。

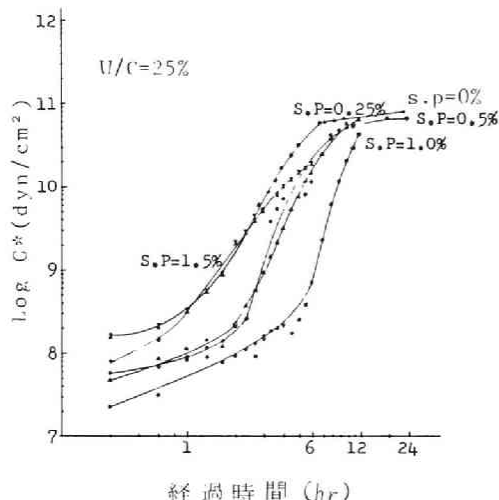


図 5.60 流動化ペーストのずり弾性率 G^* の経時変化

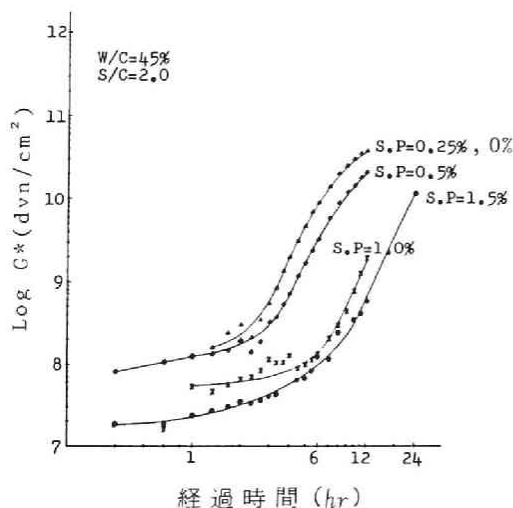


図 5.61 流動化モルタルのずり弾性率 G^* の経時変化

また図 5.59 において流動化剤の添加量を増すことはピーク値の発生時間を遅らせると共にピーク値自身も小さくなることを示している。このピーク値の意味について考察すると、速度増加が最も激しいということは水和反応による水和生成物の析出やセメント、骨材といった固体粒子の沈降：接触によるモルタル構造を形成する最も重要な時期であると考えられる。従ってこの時期に余分な外力などが加わることは、モルタルの後期材齢における品質に重要な影響を与えるであろうと予想されるので、コンクリート工において十分な配慮が必要である。また流動化剤の過剰添加はピーク発生時間が遅れ、凝結遅延効果を引き起すと考えられる。

3) ずり弾性率、体積弾性率の増加変化率

図 5.60 は水セメント比 25% のペーストに流動化剤を添加した場合のずり弾性率の経時変化である。ずり弾性率は流動化剤の添加量によって材齢初期においては低い値を示しているが数時間後から急速に増加しはじめ、12 時間付近でプレーンのものと同等まで追いついてくる。添加量を 1.5% にした場合は材料分離の傾向のため、初期における値はプレーンよりも大きな値を示しているがその後の増加は緩やかで後期においては他のものより小さい値となっている。

モルタルについてのずり弾性率の経時変化を図 5.61 に示す。モルタルのずり弾性率はペーストと同様に初期材齢においてはゆっくりと増加するが、2 時間～4 時間付近から急激な増加を示す。また流動化剤の添加の影響はペーストと同様に添加量が多くなるほど初期における値が小さくなり、また急激な増加をする時間が遅くなる傾向を示した。

ペーストの体積弾性率と流動化剤の添加量の関係を図5.62に示す。ペーストの体積弾性率は弾性率と同様に流動化剤の添加量が1.0%まであれば流動化剤の添加によって体積弾性率は一時的に低下する。その低下の程度は添加量が多い程、低い値を示しておりペーストの一時的な軟らかさの増加を意味すると考えられる。しかし体積弾性率は弾性率と同様、12時間付近において添加量にかかわらずほぼ同一の値となることを示しており、添加量が多い程急激に体積弾性率は増加するので、添加量を多くして一時的に軟らかくしたペーストはこわばりが生じ始めるとその速度が急であるといえる。体積弾性率の増加変化率をとってみると、図5.63から明らかなように流動化剤の添加量を多くしてやると、ピーク値の発生時間が遅くなっており、それだけ流動効果が長く続くといえる。1.5%のように添加量が多くなると、ほぼ、0.25%に近い傾向を示しており、材料分離によって均等性が失われるためか、この方法での判定の限界ではないかと思われる。

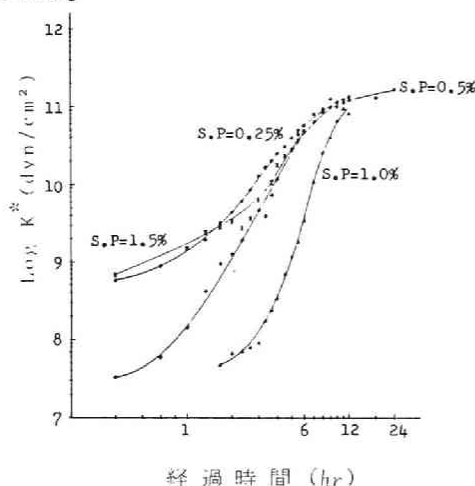


図 5.62 流動化ペーストの体積弾性率 K^* の経時変化 (SP: 流動化剤の添加量)

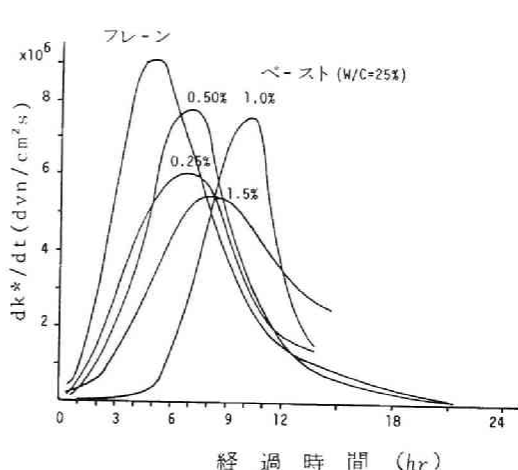


図 5.63 流動化ペーストの体積弾性率の増加変化率と流動化剤の添加量との関係

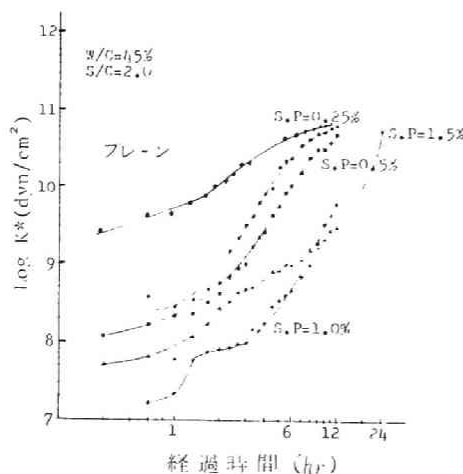


図 5.64 流動化モルタルの体積弾性率の経時変化 (SP: 流動化剤の添加量)

モルタルの体積弾性率と流動化剤の添加量の関係を図5.64に示す。ペーストと同様、添加量を多くすることによって体積弾性率は低くなり、軟らかさを増していることがわかる。また、体積弾性率が急増する時間も遅くなる傾向を表わしている。この体積弾性率の増加変化率を表わしたのが図5.65である。モルタルにおける体積弾性率の増加変化率は添加量が多くなるとピーク値の発生時間が遅くなるが、1.5%以上の添加は極端に遅くなり、しかも曲線が平坦になっている。したがって、凝結遅延効果が表われているものと考え

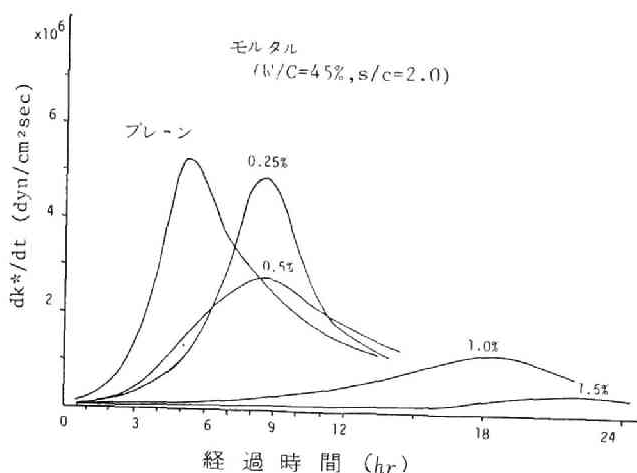


図 5.65 流動化モルタルの体積弾性率の増加変化率の経時変化

えられる。ここでプロクター貫入抵抗値とずり弾性率および体積弾性率の関係について調べてみることにした。ASTM C-403では貫入抵抗値 500psi を振動限界としており、笠井⁴⁶⁾によるとこの付近が引張破壊ひずみの最小値を示す時間であるとしている。

表 5.15 流動化ペースト、モルタルのプロクター貫入抵抗値が 500psi (始発時間) 4000psi (終結時間) におけるずり弾性率 G^* および体積弾性率 K^*

種 類	添加量(%)	始発 (時:分)	$G^* (\times 10^9 \text{ dyn/cm}^2)$	$K^* (\times 10^{10} \text{ dyn/cm}^2)$
ペースト	0	2:20	2.8	1.6
	0.25	3:00	1.2	1.2
	0.50	3:50	7.2	8.5
モルタル	0	4:40	3.8	4.3
	0.25	4:10	2.3	1.0
	0.50	6:00	2.4	1.2
	1.00	12:00	2.3	0.7
平均			3.1	1.5
種 類	添加量(%)	終結 (時:分)	$G^* (\times 10^{10} \text{ dyn/cm}^2)$	$K^* (\times 10^{10} \text{ dyn/cm}^2)$
ペースト	0	3:20	0.98	3.4
	0.25	4:05	0.32	2.5
	0.50	5:05	1.2	3.4
モルタル	0	7:00	1.1	6.0*
	0.25	6:20	1.1	2.7
	0.50	8:30	1.2	2.9
平均			1.0	2.9

表 5.15は、水セメント比25%のペーストおよび水セメント比45%、砂セメント比2.0のモルタルに流動化剤を添加して行った場合の貫入抵抗値 500psi および 4000psi でのずり弾性率および体積弾性率を示したものである。表からモルタルのずり弾性率に関しては 500psi は平均値で $2.7 \times 10^9 \text{ dyn/cm}^2$ 、一方 4000psi では平均値で $1.1 \times 10^{10} \text{ dyn/cm}^2$ となっている。しかしペーストのずり弾性率、体積弾性率はモルタルとはオーダーは同じであるが、多少ばらついた値となっている。モルタルの体積弾性率は無添加のものに比べて流動化剤を添加することで値が低

下する傾向にある。

4) ずり粘性率の経時変化

ずり粘性率は(5・23)式における減衰係数を差による方法で求める場合、2つの型枠中の試料が同等のもので、しかも横波の伝播速度と透過周波数がほぼ一致しておらねばならず、現在の横波振動子の性能からいってこの条件を満たすのは十分であるとは言えないが、これらの条件が満たされた実験結果についてまとめるとペーストについては図5.66、モルタルについては図5.67が得られた。

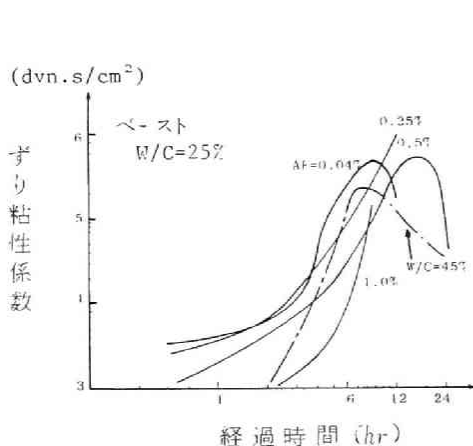


図 5.66 流動化ペーストのずり粘性率の経時変化

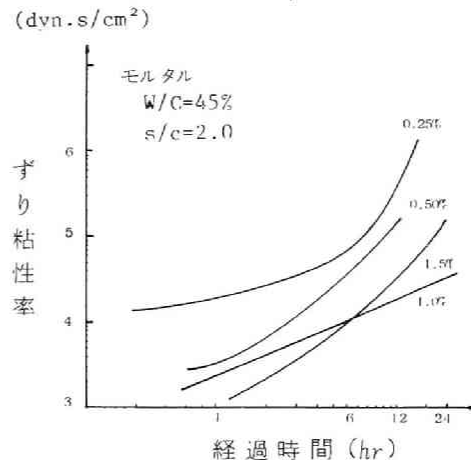


図 5.67 流動化モルタルのずり粘性率の経時変化

まずペーストについて考察する。ただし図には無添加のペーストの結果は水セメント比45%ものしか得られなかったため、25%のものはのせていない。流動化剤の添加量を多くすることでずり粘性は低下する。しかし、経時的に粘性が増加しはじめると、添加量の多いもの程粘性の増加割合が急になる。添加量の0.5%のペースト、無添加の水セメント比45%のペースト、およびAE剤を添加したペーストはピーク値を示しその後低下するという結果が得られた。このような傾向は松藤らの結果にも表われているが、この現象の理由についての説明されていない。ずり粘性率は(5・23)式において横波速度の3乗に比例し、透過周波数の2乗に逆比例することから、速度の増加に対して透過周波数の増加が上まれば上記の現象となる訳である。従って透過周波数が遅延時間(または緩和時間)に関係すると考えると、ピーク値を示した後低下するという現象は、試料が急激に弾性体へと移行し始める点であると解釈して良いであろう。

モルタルについては測定範囲内ではこのような現象は見られず、増加している。また流動化剤の添加量を多くしてやると、ずり粘性率は低下しており、流動化剤の添加はずり弾性率や体積弾性率ともどもに粘弾性的性質を一時的に下げることに関与していることが本方法で確認することができた。

ただし、1.5%以上の添加では材料分離の傾向があり、それ以下の添加量の場合とは少し違うということを理解しておくべきである。横波によるずり粘性率に対して縦波の減衰を利用して動

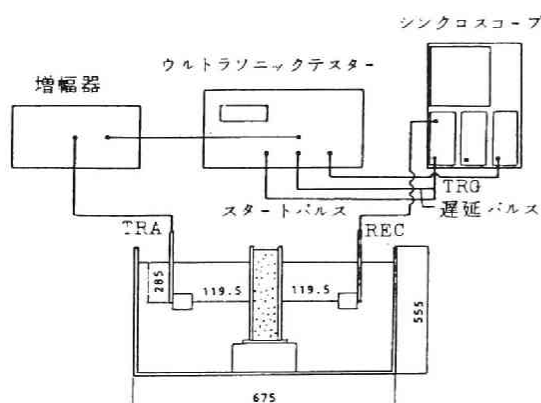


図 5.68 水浸置換法による装置図 (単位 mm)

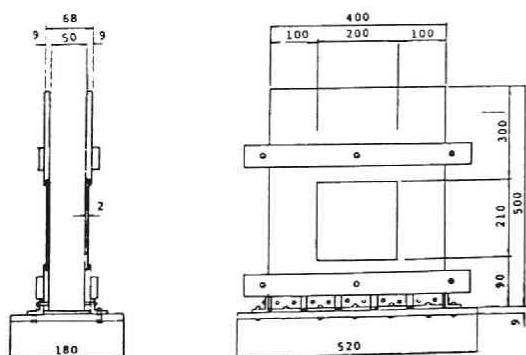


図 5.69 型 枠 詳 細 図 (単位 mm)

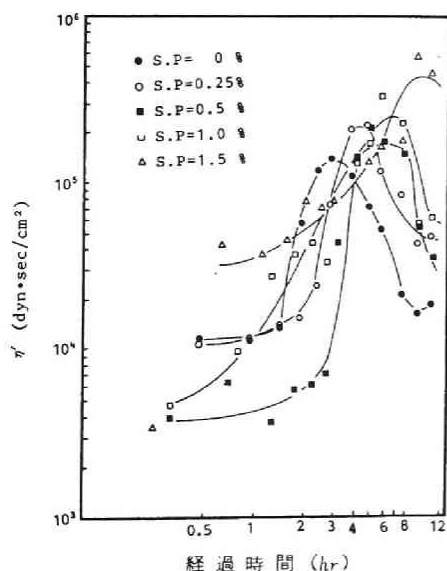


図 5.70 動的粘性率 η' の経時変化と流動化剤の添加量の関係
($W/C=45\%$, $s/c=2.0$ 流動化モルタルSP : 添加量)

動的粘性率を測定してみることにした。

動的粘性率 η' は (5.20) 式により求めることができるが、減衰係数の測定には水中置換法により (4.62) ~ (4.64) 式を用いて計算した。水中置換法による実験装置図および型枠詳細図を図 5.68, 図 5.69 に示す。振動子は 140 KHz 用縦波振動子 (PZ T系) $\phi 40\text{mm}$ を用いている。型枠の材質は合板ベニヤで表面は油性ペイントで塗装している。また型枠は組立式で接合面はゴム膜をはさみ、底面もゴム膜を敷いて超音波パルスの型枠中の伝播を遮断している。超音波ビームの直接当たる試料透過面には 2 mm 厚の透明アクリル板を使用した。これは固有音響インピーダンス (ρc) がモルタルと水の間のような材料で、ある程度剛性がある程度薄いものであるということ、しかも試料の境界面が観察できるということで採用した。板厚は 2 mm 以上は変形しないという予備実験から決定した。

以上の装置を用いて測定した動的粘性率の 12 時間までの経時変化は図 5.70 の結果となった。図より動的粘性率もずり粘性率と同様に流動化剤の添加量を多くすることにより一時的に粘性を下げるが、1.5% のように多くなるとかえって粘性が高くなることを示している。またずり粘性率においてみられたピークが今回の配合すべてにみられ、ピーク発生時間は添加量が多くなるほど遅くなる傾向を示した。このことから流動化モルタルが弾性的になり始める時間が、添加量によって遅らせることができることがわかる。

流動化モルタルの粘性を縦波や横波の伝播挙動により測定する場合、減衰係数を得るために差による方法、多重反射法、水浸置換法を適用することについて、各方法には問題を多く残している。例えば、差による方法の場合、二つの型枠を使用する場合は試料の均一性について問題があり、同

一試料中に二つのピックアップを埋設する方法ではピックアップを損傷なしで回収できるのは3～4時間が限度であり、長時間の測定には向いていない。また多重反射法では3～4時間以後では側面、底面からの反射法により多重反射波を取り出すのが困難であり長時間の測定が難しい。水浸置換法は装置が大がかりとなり現場への適用ができないことや型枠の影響を取り除く工夫が必要である。しかし問題点は多くあるものの今後これらを解決することは、流動化コンクリートの特徴である従来のコンクリートとは違ったレオロジー的性質を知る上で、粘性の測定は不可欠であり、測定技術の発展を望むものである。

5) 圧縮強度と伝播速度、体積弾性率との関係

コンクリートの圧縮強度と超音波縦波速度の関係は Faccaoru⁴⁸⁾ によって指数関係があることが示され一般に認められている。しかし Elvery⁴⁹⁾ らや Byfors⁵⁰⁾ らは圧縮強度の対数を縦軸に横軸に縦波速度をとると、初期材齢と後期材齢とは違った直線となり、折線の折点が図5.71、図5.72のように2～3 km/sの間にあることを示した。

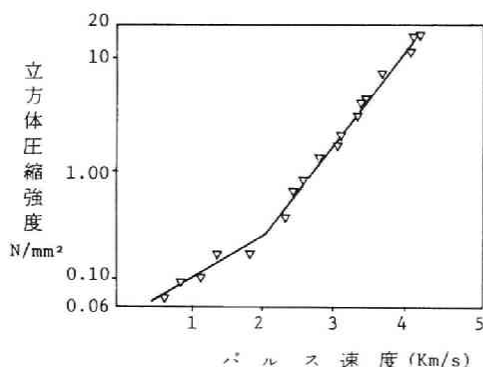


図 5.71 パルス速度と強度の関係 (Elvery⁴⁹⁾)

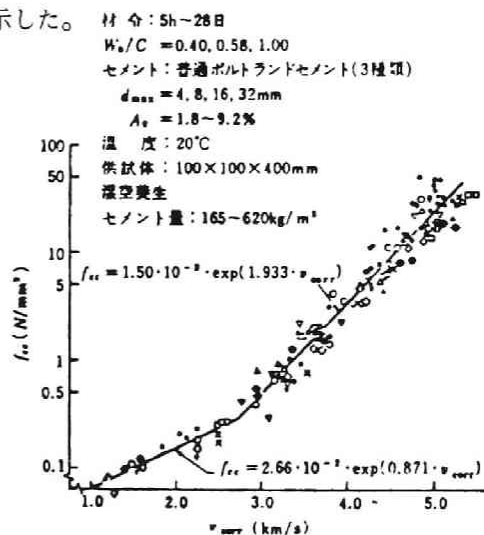


図 5.72 補正パルス速度 V_{corr} と圧縮強度 f_{cc} の関係 (Byfors⁵⁰⁾)

本研究では、ペースト、モルタルの圧縮試験を材齢 3, 6, 12, 24時間において行ない、供試体は $\phi 5 \times 10$ cm の円柱型枠とした。試験方法は、6時間程度までは型枠の底板を残して脱型し、

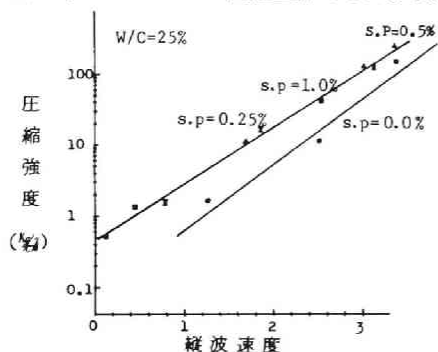


図 5.73 流動化ペーストの圧縮強度と縦波速度の関係 (SP: 流動化剤の添加量)

上部にガラス板を載せプロクラー貫入抵抗試験機によって圧縮する方法を取り、それ以後はアムスラー型モルタル圧縮試験機によって行った。

実験は流動化ペースト、モルタルの圧縮強度と縦波・横波の伝播速度および体積弾性率との関係を明らかにすることを目的とした。水セメント比25%のペーストに流動化剤を添加した場合の縦波についての結果を図5.73に示す。図中の各点は4個の平均値であり、型

枠脱型時に強度試験が出来なかったものや、3 km/s

を大きく越えるものは省いてある。プレーンペーストは流動化ペーストに比べ同一速度では低い値となっているが、これは水セメント比25%のペーストが均一に練り混ぜにくいためである。流動化ペーストは添加量が0.25%から1.0%の間ではほぼ同一の直線にのることがわかる。実験式を求めると次式が得られた。

$$f_{cp} = 0.445 \exp(1.833 V_{lp}) \quad (5 \cdot 24)$$

ここで f_{cp} はペーストの圧縮強度 (kg/cm^2)、 V_{lp} はペーストの縦波速度 (km/sec)である。

モルタルについては水セメント比45%、砂セメント比2.0の配合としてペーストと同様の実験を行った結果が図5.74である。プレーンモルタルはペーストと同様に直線を示し実験式については次式が得られた。

$$f_{cm} = 0.189 \exp(2.167 V_{lm}) \quad (5 \cdot 25)$$

ここで f_{cm} はモルタルの圧縮強度、 V_{lm} はモルタルの縦波速度 (km/sec)である。コンクリートについて5・2・3・(1)で論議した

Byfors の実験式と比較してみる。彼の実験式 $f_{cc} = 0.271 \exp(0.871 V_{corr})$ の修正速度について空気量5%，最大寸法5mmとして(5・18)式に代入して、測定速度が1km/secとすると V_{corr} は1.93km/secになるので f_{cc} は1.46kg/cm²となる。これに対して(5・25)で計算すると1.63kg/cm²となっておりほぼ同じ強度を推定することになる。しかし流動化モルタルになると図のように添加量によって違った傾向を示し、式によって表現するのは難しくなる。従って流動化モルタルについては個々の添加量、配合、養生条件について圧縮強度と縦波速度の関係を図に表わして調べるのが良いと判断される。

横波速度についての結果を図5.75、図5.76に表わす。プレーンペーストは縦波のように直

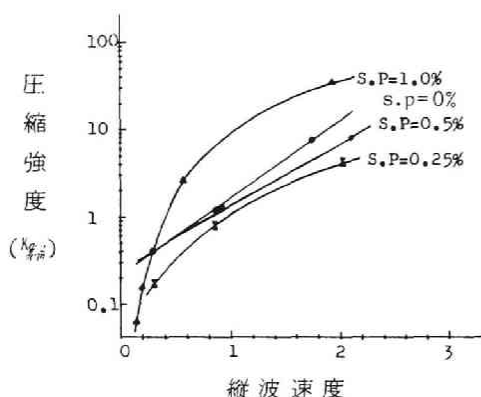


図 5.74 流動化モルタルの圧縮強度の縦波速度の関係 (SP: 流動化剤の添加量)

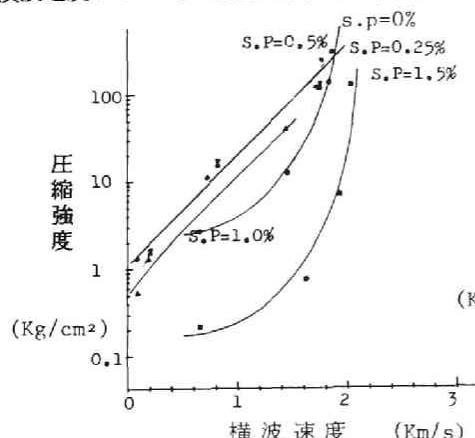


図 5.75 流動化ペーストの圧縮強度と横波速度の関係 (SP: 流動化剤の添加量)

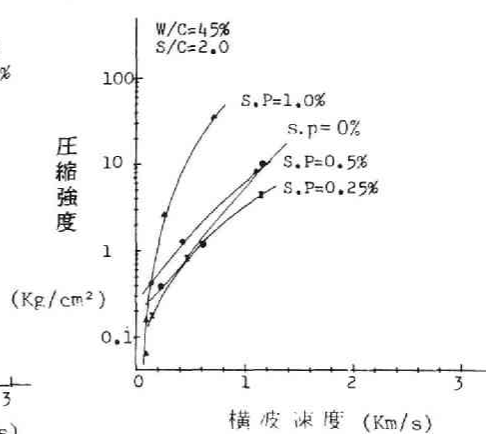


図 5.76 流動化モルタルの圧縮強度と横波速度の関係 (SP: 流動化剤の添加量)

線とはならず曲線となっており、流動化ペーストは添加量が0.25%から1.0%までは直線となっている。流動化ペーストの横波速度を V_{tp} として実験式を求めると次式が得られる。

$$f_{cp} = 0.756 \exp(3.074 V_{tp}) \quad (5 \cdot 26)$$

しかし1.5%のように添加量が多くなると違った傾向を示す。

モルタルについてはプレーンのものについては直線となり実験式を求めると横波速度を V_{tm} として次式が得られた。

$$f_{cm} = 0.145 \exp(3.218 V_{tm}) \quad (5 \cdot 27)$$

しかし流動化モルタルの場合は添加量によって違った傾向となっており、添加量が1.00%のものは勾配が急であり横波速度の圧縮強度に対する感度が鈍くなっていることを示したものである。

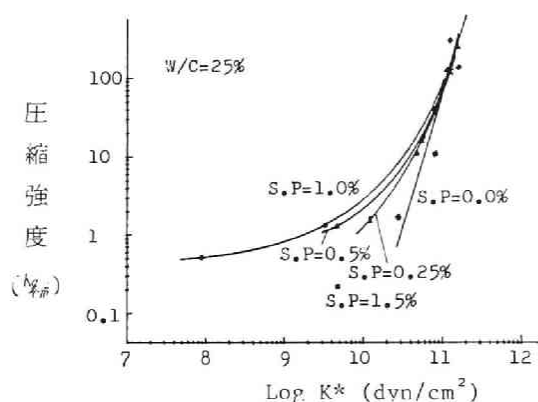


図 5.77 流動化ペーストの圧縮強度と体積弾性率 K^* の関係 (SP: 流動化剤の添加量)

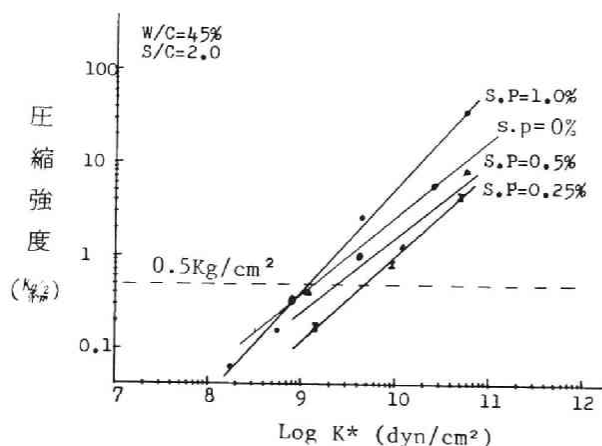


図 5.78 流動化モルタルの圧縮強度と体積弾性率 K^* の関係 (SP: 流動化剤の添加量)

本研究において求めた物性値の中で圧縮強度と最も関連性があるのは体積弾性率であると考えられる。ペーストの圧縮強度と体積弾性率の関係を図 5.77 に、モルタルの圧縮強度と体積弾性率の関係を図 5.78 に示す。ペーストについては、プレーンの場合直線であるが、添加量が多くなると曲線となり曲率が大きくなる傾向を示している。これに対してモルタルでは、ほぼ 45° に近い直線となっている。

この体積弾性率を例えば図 5.78 ににおいてスライディングフォーム工法に適用するとすると、型枠が移動してコンクリートが自立するにはコンクリートの密度を 2.3 g/cm^3 として 1 m につき 0.23 kg/cm^2 以上の強度が必要であり⁵¹⁾、安全率を 2 と考えると約 0.5 kg/cm^2 以上の強度を必要とする。笠井によると、1 リフト 120 cm として経験的に 0.4 kg/cm^2 が必要であるとしている。従って図中の破線を 0.5 kg/cm^2 として体積弾性率を求めると $1.0 \sim 4.5 \times 10^9 \text{ dyn/cm}^2$ の範囲になり、体積弾性率がこの範囲に入ってくれば型枠を移動

して良いということになる。笠井⁵³⁾によると始発、終結における圧縮強度を $0.1 \sim 0.2 \text{ kg/cm}^2$ および 0.6 kg/cm^2 としており、体積弾性率から図により求めることも可能である。

5・4・4 まとめ

超音波パルス法により流動化モルタルの性質の経時的变化について実験した結果についてまとめると以下の結論が得られた。

- 1) 流動化剤の添加はモルタルの縦波伝播速度の経時的増加を遅らせる。また添加量を多くすることで速度増加が急になる時間が遅れる。このことは流動化剤を多く添加することが凝結を遅延させることを示している。この結果については横波伝播速度も同様である。
- 2) 縦波および横波の速度増加変化率曲線はセメントの反応速度曲線の形状に類似している。モルタルの縦波の速度増加変化率のピーク時における縦波速度は約 1 km/sec にあり、横波については 0.5 km/sec 付近にあることが判明した。流動化剤の添加はこのピーク発生時間を遅らせるのと、ピーク値も下げ、この傾向は添加量によって影響される。このピーク値発生時にはセメントの水和反応が最も激しい時期であるから、余分な外力などをかけないよう養生には十分な配慮が必要である。
- 3) モルタルのずり弾性率はペースト同様に初期材齢においてゆっくりと増加するが2～4時間付近から急激に増加する。流動化剤の添加の影響は、添加量が多くなるほど、初期におけるずり弾性率が小さくなり、また急激な増加をする時間が遅くなる。
- 4) モルタルの体積弾性率は、流動化剤の添加量を多くすると低くなり、その値が急増する時間が遅くなる。モルタルの体積弾性率の増加変化率がピーク値を示す時間は添加量が多くなると遅くなる。1.5%以上の添加は、この時間を極端に遅らせ、凝結遅延効果が表われる。
- 5) プロクター貫入抵抗値が示す特性は流動化剤を添加したものも無添加のものと大差はなく、特に貫入抵抗値 500 psi (約 35 kg/cm^2) におけるモルタルのずり弾性率は約 $2.7 \times 10^9 \text{ dyn/cm}^2$ であり、貫入抵抗値 4000 psi (約 280 kg/cm^2) では約 $1.2 \times 10^{10} \text{ dyn/cm}^2$ であった。したがって、流動化剤を添加したモルタルの凝結の始発、終結はずり弾性率がこれらの値に達した時に対応すると考えられる。
- 6) ずり粘性率は現在のところ十分な測定技術は確立されていないが、著者が測定出来た範囲内では、流動化剤の添加により、ずり粘性は低下し、セメント重量に対して1%以下では添加量により粘性は低下するが、1.5%の添加では逆に増加する。
- 7) 動的粘性率に関してもずり粘性率と同様に、流動化剤の添加量を多くすることによって一時的に粘性を低下させるが、セメント重量に対して1.5%のように多量添加するとかえって粘性が高くなる。動的粘性率の増加曲線にはピーク値が存在し、ある時間経過すると、粘性は低下しモルタルがより弾性的になる。このピーク発生時間は添加量が多くなると遅くなる。
- 8) モルタルの圧縮強度と伝播速度の関係はプレーンの場合には、縦波についても横波についても指数関係式が成立する。しかし、流動化した場合には数式化が困難であり、図から直接推定する方法が良いであろう。
- 9) モルタルの圧縮強度と体積弾性率の関係は伝播速度と同様に添加量によって影響されるが、両対数グラフに表わすと勾配が 45° に近い直線となる。

5・5 結 語

音波特性によるフレッシュコンクリートの物性の経時変化について研究を行った結果、次のような結論を得た。

- 1) コンクリートの伝播速度はセメントの水和反応速度や水和の程度に影響される他、骨材量、粒径、骨材の最大寸法の影響を受ける。
- 2) プロクター貫入抵抗値と縦波伝播速度の関係は折れ線となり極く初期材齢において、速度は貫入抵抗値に敏感であり、始発時間以後は鈍くなる。
- 3) 初期材齢における圧縮強度と縦波伝播速度の関係は指数式で表わすことができ、空気量、骨材の最大寸法についての補正速度を用いることにより、縦波伝播速度からの圧縮強度の推定精度を向上させることができる。
- 4) ペースト、モルタルの動的レオロジー定数は周波数依存性を有し、経時的に変化するが、その周波数特性は配合要因により影響を受ける。すなわち、ペーストに関しては水セメント比の違いが動的弾性率、動的粘性率に影響するが、モルタルの場合には骨材量が動的弾性率よりもむしろ動的粘性率に強く影響する。
- 5) 縦波および横波の伝播挙動を同時測定することによって得られる、ずり弾性率、体積弾性率は経時的物性変化を簡単に表現することができ良い指標となる。
- 6) プロクター貫入抵抗試験により決められている始発時間は、ずり弾性率、終結時間は体積弾性率がある一定値に達した時間に対応した。しかし、流動化した場合にはこれらの関係は崩れ、貫入抵抗値のみで凝結過程を判定することは適当ではない。従って、これらの物性値の増加変化率曲線を含めて初期材齢コンクリートの性質を把握すべきである。
- 7) 本研究で用いた測定方法を流動化ペースト、モルタルの凝結硬化過程に適用した結果、流動化剤の添加によって伝播速度の増加が遅れる他、ずり弾性率、体積弾性率、ずり粘性率、動的粘性率が低下する。また、これらの経時的増加割合に影響することが示され、流動化ペースト・モルタルが有する性質の経時的変化を表現することが判明した。

参 考 文 献

- 1) 佐治泰治, 松藤泰典: “初期材齢におけるコンクリートの諸性状” コンクリート工学, Vol.19, No. 5, 1981, (3-12)
- 2) 岡田清, 六車熙: “改訂新版コンクリート工学ハンドブック”, 朝倉書店, 1981, (282)
- 3) 前掲の 2) (282)
- 4) 前掲の 3) (282-283)
- 5) Johansen, R. “En praktisk prøvningsmetode for in situ bestemmelse av byggverksfasthet” Nordisk Betong, No. 4, 1977 (13-17)
 ‘Properties of set concrete at early ages State-of-the-art-report’ Matériaux et Constructions, Vol. 14, No. 84 (399-450) より転掲
- 6) Kelly, T. M., D. E. Bryant: “Measuring the rate of **hardening** of concrete by Bond Pullout Pins”, Proc. ASTM, Vol. 57, 1957 (1029-1040)
- 7) Bellander, U: “Hallfasthet i färdig konstruktion Del 3. Oförstörande metoder. laboratorie och fältförsök.” Swedish Cement and Concrete Research Institute, Research 3, No. 77, Stockholm.——前掲 5) と同じ。
- 8) Malhotra, V. M.: “Maturity concept and the estimation of concrete strength, a review.” Dept. of Energy, Mines and Resources, Mines Branch Information Circular, Ottawa.
- 9) Freiesleben, Hansen, Pederson,: “Maleinstrument til kontrol af betons heardening.” Nordisk Betong, No. 1, 1977, (21-25)
- 10) 前掲の 2) (283)
- 11) 近藤泰夫, 坂静雄編, “コンクリートハンドブック” 朝倉書店, 昭和32年, (153)
- 12) Jones, R.: “Non-destructive testing of concrete.” Cambridge University Press. Cambridge, 1962, (40-64)
- 13) Kaplan, N. F.: “Ultrasonic pulse velocity, dynamic modulus of elasticity, Poisson's ratio and the strength of concrete made with thirteen different **coarse** aggregates,” RILEM Bulletin. No. 1, 1959, (59-73)
- 14) Nowkoye, D. N.: “Prediction and assessment of concrete properties from **pulse velocity** tests.” Mag. Conc. Res., Vol. 25, No. 82, 1973 (39-46)
- 15) Reynolds, W. N., S. J. Wilkinson and D. C. Spooner.: “Ultrasonic wave velocities in concrete ” Mag. Conc. Res. Vol. 30, No. 104, 1978 (139-144)
- 16) Boucher, S.: “Effective moduli of quasi-homogenous quasi-isotropic composite materials composed of elastic inclusions in an elastic matrix. (i) Case of infinitesimal concentrations of inclusions. (ii) Case of finite concentrations of inclusions.” Revue Mécanique. (1-7). Vol. 22, 1976, (1-6)
- 17) Byfors, J : “Pulse velocity measurement for indication of the compressive strength at early ages.” Proc. of International Conference on Concrete at Early Ages, RILEM, 1982, (117-122)
- 18) Elvery, R. H. and L. A. M. Ibrahim,: “Ultrasonic assessment of concrete strength at

- early ages." Mag. Conc. Res. Vol. 28, No. 97, 1976, (181-190)
- 19) Van der Winden, N. G. B., A. W. Brant: "Ultrasonic testing for fresh mixes" Concrete, Vol. 11, No. 12, 1977 (25-28)
- 20) Casson, R. B. J., P. I. J. Domone: "Ultrasonic monitoring of the early age properties of concrete." Proc. of International Conference on Concrete at Early Ages, RILEM, 1982 (129-135)
- 21) Elverly ら: 前掲の 18)
- 22) Tomsett, H. N: "The practical use of ultrasonic pulse velocity measurements in the assessment of concrete quality" Mag. of Conc. Res., Vol. 32, No. 110, 1980. (7-16)
- 23) 佐治泰治, 松藤泰典: 前掲の 1)
- 24) Commission 42-CEA, RILEM: "Properties of set concrete at early ages State-of-the-Art Report." Materials and Structures, Vol. 14, No. 84, 1981 (399-450)
- 25) Fulton, F. S: "The rate of hydration of Portland cement." Laboratory report SF-4, Portland Cement Institute, Johannesburg, 1962
- 26) Jung, F: "Einige Versuche über Volumenänderungen des erhärtenden Betons." Zement und Beton. Sep./Oct. 1975 (17-21)
- 27) 実吉純一, 菊池喜充, 能本乙彦監修, "超音波技術便覧" 日刊工業社 (1332)
- 28) Wyllie, M. R. J. A. G. Gregory, L. W. Gardner, "Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media," Geophysics, Vol. 21, 1956 (41-70)
- 29) Mitchell, L. J.: "Dynamic testing of materials" Proc. of Highway Research Board, Vol. 33, 1954 (242-258)
- 30) Byfors, J.: 前掲の 17)
- 31) Ibrahim, L.A.M: "Ultrasonic assessment of concrete strength at early ages" Dep. of Civil and Municipal Engineering, University of London, Thesis of PhD. 1976, (1-222) ——24) より転掲
- 32) Elverly, R. H., L. A. M. Ibrahim, 前掲の 18)
- 33) Elverly, R. H., L. A. M. Ibrahim: 前掲の 18)
- 34) Günzler, J.: "Mechanische Eigenschaften von jungen Beton im Gleitbau" Bauplanung Bautechnik, Vol. 24, No. 8. 1970, (372-375)
- 35) Plank, A.: "Über des Verformungsverhalten jungen Betonmortels bei Druckbeanspruchung." Betonstein-Zeitung, Vol. 37, No. 12, 1971, (741-751)
- 36) Byfors, J.: "Plain concrete at early ages," Swedish Cement and Concrete Research Institute, Fo. 3, No. 80, (1-345) ——24) より転掲
- 37) Elverly, R. H., L. A. M. Ibrahim: 前掲の 18)
- 38) de Haas, G. D. et al: "The shrinkage of hardening cement paste and mortar." Cement and Concrete Research, Vol. 5, No. 4, 1975 (295-320)
- 39) 佐治泰治, 松藤泰典: 前掲の 1)
- 40) Stepisnik, J., M. Lukac and I. Kocuvan: "Measurement of cement hydration by Ultra-

- sonics." Ceramic Bulletin, Vol. 60, No. 4, 1981, (481-483)
- 41) Hillger, W.: "Verbesserungen und erweiterungen von ultrashallprüfverfahren zur zerstörungsfreien fehlstellen-und qualitätskontrolle von betonbauteilen." Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Dissertation, 1983, (111-116)
- 42) 山田順治, 有泉昌編 : "わかりやすいセメントとコンクリートの知識" 鹿島出版会, 昭和52年 (42-66)
- 43) 小野木重治, "レオロジー要論" 槇書店, 1973, (54-57, 89, 124)
"化学者のためのレオロジー" 化学同人, 1982, (56-60, 84)
- 44) Casson, R. B. J., P. I. J. Domone: 前掲の 20)
- 45) 松藤泰典, 河上嘉人 : "超音波横波法によるセメントペーストの凝結過程に関する検討" セメント技術年報, Vol. 34, 昭和55年, (63-66)
- 46) 笠井芳夫 : "コンクリートの初期性状" コンクリートジャーナル, Vol. 11, No. 10, 1973, (1-15)
- 47) 松藤泰典, 河上嘉人 : 前掲の 45)
- 48) Facaoaru, I.: "Non-destructive testing of concrete in Romania." Institute of Civil Engineers, Symposium on non-destructive testing of concrete and timber, June, 1969, (499-517)
- 49) Elverly, R. H., L. A. M. Ibrahim: 前掲の 18)
- 50) Byfors, J: 前掲の 17)
- 51) 岡田 清, 六車熙 : 前掲の 2)
- 52) 笠井芳夫 : "コンクリートの初期性状(2)" コンクリート工学, Vol.17, No. 3, 1979, (97-103)
- 53) 笠井芳夫 : 前掲の 46)

第 6 章 結

論

第6章 結 論

本論文はコンクリート施工の合理化、省力化を遂行する上で重要と思われる品質管理上の問題で、特に練混ぜ直後におけるコンクリートが振動などの繰返し荷重を受けた場合の動的性質およびその経時的変化特性に関する基礎的資料を得ることを目的として、一連の実験研究を行ったものである。

以下に本研究より得られた結果を要約し、結論とするとともに今後の問題についてもふれることにする。

本論文では、まず第1章において本研究の目的と工学上の意義を明らかにし、フレッシュコンクリートの動的性質に関する、従来の研究を紹介するとともに本研究の方針を示した。

第2章ではフレッシュコンクリートの動的問題を扱う上で重要と思われる基礎的な資料を得ることを目的としてペースト、モルタル、コンクリートのせん断変形特性、すなわち応力・ひずみ関係を明らかにし、更に一部では紛体的な性質に着目した検討を行った。Powers の実験に示唆を得て改良を加えた外円筒回転型回転粘度計の外円筒を1度/秒の低速回転させることによって得られるせん断応力-せん断ひずみ曲線からペースト、モルタルのせん断に対する性質を解明するための実験を行った。コンクリートについてはベーンせん断試験機に一部改良を加えてペースト、モルタルと同様の実験を行った。

以上の実験結果から、

- (1)ペーストは、水セメント比が小さくなるとみかけのせん断弾性係数やせん断強度は増加する。しかし、これらは界面活性剤によって粒子間引力を低減させれば低下する。
- (2)モルタルやコンクリートのみかけのせん断弾性係数やせん断強度はペーストより骨材に関する条件によって大きく影響を受け、骨材の充填状態が密になる配合ほど増大する。
- (3)コンシステンシーを硬さの程度と定義すると、みかけのせん断弾性係数はコンシステンシーそのものを表わすことになり、コンシステンシーを数値的に表現することが可能となる。また、みかけのせん断弾性係数やせん断強度は経時的に増加し、コンクリートの凝結硬化過程における重要な力学的性質を表わすものと考えられる。

- (4)フレッシュコンクリートのせん断応力・変形曲線において弾性限界に類似した点が存在し、この点がフレッシュコンクリートをビンガム体と仮定する場合の降伏値に相当すると考えられる。

この弾性限界点は配合によって多少異なるが、 4° (0.07 rad) 以下の変形ではほぼ弾性的な挙動を呈することが示された。

- (5)フレッシュコンクリートは骨材量の多い場合や垂直応力が大きい場合にはダイラタンシーを示すため、その体積膨張が容器などで拘束される場合にはせん断強度は上昇する。しかし、ダイラタンシーによるせん断強度上昇分の補正方法は難しく、今後の課題として残された。

本研究で用いられた各種試験装置から得られるせん断特性値は、従来からのコンシステンシーメータから得られる値が相対値であるのに比べて物理量である。従って施工時における合理的な

配合条件を決定する際の良き指標となり得るものと考えられる。また、ここで得られた粘着力や内部摩擦角は将来、型枠に対する側圧の計算などへの応用も可能である。

第3章では、練り混ぜられてから打込みが完了するまでに受ける種々の動的荷重の中で、特に締固め時に受ける繰返し荷重によってフレッシュコンクリートの性質がどのように変化するのかを、第2章で得られた結論を基として振動式回転粘度計、振動台、球引上げ型粘度計の3種類の試験装置を用い、温度一定のもとでの種々の条件での振動実験を行った。実験の結果、以下の結論を得た。

(1)振動下におけるペースト、モルタル、コンクリートは振動機によって与えられる繰返し応力が試料の有するみかけの弾性限界以下であれば粘弾性体として挙動し、それ以上であればビンガム流動もしくは一時的な構造破壊によりニュートン流動に近い挙動を示す。

(2)振動機によって正弦振動を受けているコンクリートの動的レオロジー定数は振幅が大きくなると小さくなるが、その傾向は水セメント比が小さい程著しい、従って水セメント比の小さいものほど振動締固めに対する効果は大きい。また、ペーストやモルタルの動的レオロジー定数は周波数依存性を有しているが、同一振動数においては振幅を大きくすると低下し、より効果的である。

(3)フレッシュコンクリートの振幅共振曲線は1自由度振動系の共振曲線に類似すること、またその1次共振点はコンクリートの水セメント比によって多少異なるものの、土木用の一般的配合のコンクリートでは、100Hz前後となることが示された。また共振曲線は加速度を増加すると鋭くなり、4g以下の加速度では共振点はほとんど変化しないが、粘性の低下が認められる。また、この共振点は材齢3時間程度の間に15~20Hz/時間の割合で高くなる。

さらに、これらの結論を基として流動化コンクリートを振動させた場合の性質について実験を行った結果以下の知見を得た。

(4)流動化コンクリートは定常流動では、オストワルド流動に類似するが、振動下ではニュートン流動もしくはビンガム流動を示す。従って流動化コンクリートを振動させるためには最初は速度勾配を大きく（即ち振幅を大きくするか、加速度を大きくするか、振動数を高くするか、いずれかの方法）するのが効果的である。

(5)流動化剤の繰返し添加を2時間以上も継続すると、スランプに変化はなくともレオロジー定数は大きくなり、粘稠なコンクリートとなることから締固め効果に影響する可能性がある。またこの傾向はベーススランプが小さい程顕著になる。

本章で得られた結果は、コンクリートの最適締固め条件を決定する上で重要であり、また再振動締固めを行う際の最適な振動条件の決定への適用も可能である。

第4章ではフレッシュコンクリート中を伝播する縦波の挙動について、配合の差が伝播速度・動的弾性率・動的粘性率などの動的パラメータに及ぼす影響を検討した。実験の結果以下の知見を得た。

(1)ペースト、モルタル、コンクリートの練り混ぜ直後における縦波伝播速度は、空隙量によって決まるが、その速度は一般に用いられる配合では100.m/sec前後となる。しかしセメント水和の

進行、運搬などによる気泡の減少によりその速度は経時的に増加することが実験的に確かめられた。また、フレッシュコンクリートの縦波伝播速度式として分散系の速度式が適用でき、また数時間後の材齢では多孔質弾性体の波動理論式が適用できることが明らかとなった。

(2)フレッシュペースト、モルタル、コンクリートの伝播速度以外に透過周波数、減衰係数を測定することにより動的弾性率、動的粘性率が計算でき、これらによって配合による差を定量的に判定することが可能となった。ペーストについては動的弾性率および動的粘性率と水セメント比との関係について実験式を提案した。一方、モルタルやコンクリートでは骨材の充填状態が密になるほど動的レオロジー定数は増加することが判明したが、数式化するまでには至らなかった。

(3)超音波パルス法によって、内部振動機により振動を受けているコンクリートの動的レオロジー定数を測定することが可能であり、加速度の増加が動的レオロジー定数を低下させることが判明した。また、動的弾性率は水セメント比50%、細骨材率30%から50%のコンクリートで2～20 MPa の間で変化する。

超音波パルス法は、コンクリートを静置させたまゝで物性値としての動的レオロジー定数を測定することが可能であるため、品質管理方法としては今後有望な方法である。

また、フレッシュコンクリートの減衰が大きいことや伝播速度が遅いことから生じてくる、測定技術上の問題が解消されれば、反射波を利用してトンネルの覆工コンクリートや場所打杭の充填コンクリートの厚さの測定などの施工管理への応用が可能となる。

第5章ではフレッシュコンクリート中を伝播する音波特性によって物性の経時的变化を定量的にとらえ、配合要因との関係を検討した。

実験結果をまとめると以下の結論を得た。

(1)フレッシュコンクリート中を伝播する弾性波速度は骨材に関する要因によって影響されるとともに、その経時的増加はペーストの水和の進行度によって決まる。また強度特性と伝播速度の関係は初期材齢においては指数関数式で表わすことができる。フレッシュコンクリートの凝結硬化過程は横波と縦波の速度比の経時変化によっても確認することができる。

(2)動的パラメータとしての動的弾性率、動的粘性率は弾性波速度と同様に配合によって決まり、セメントの水和とともに増加する。また、これらの動的パラメータは周波数依存性を有するが、セメントのゲル構造や骨材粒子の骨格構造の性質を推定する上での貴重な情報を与えるものであり、コンクリート物性の経時的变化を定量的に扱って行く上で重要である。

(3)縦波と横波の伝播挙動を同時測定することによって得られる弾性率、体積弾性率といった動的パラメータの経時変化率は、セメントの水和反応曲線に類似し、そのピーク値は配合によって変化することが判明した。

このようにフレッシュコンクリートの凝結硬化過程を物理量としてとらえることが可能となり、コンクリート工事の各工程での品質判定が非破壊的に行えることの可能性を示唆することができた。

本方法を流動化モルタルの凝結硬化過程の測定に応用した結果、流動化剤の添加量によって変化するモルタルの性質を定量的にとらえることができ、その品質判定上有用であることが示された。

以上のように、コンクリートが型枠に打ち込まれ静置されてからの性質が経時的に変化して行く様子を音波特性の変化によって観察することが可能となった。今後本方法を型枠の移動時期、脱型時期の決定、再振動可能時間などへの適用や流動化剤のような新しい混和剤が開発された場合の凝結硬化過程の観測などの方面への活用が考えられる。

最後に、本研究の題目がフレッシュコンクリートの動的性質についての基礎的研究であるが、動的な問題は非常に広範囲にわたるため、到底全部を網羅することはできなかった。しかし、振動中のコンクリートはどのような物理量を有しているのだろうかという疑問から出発し、さらに型枠に静置されたコンクリートの性質がどのように変化し、硬化して行くのかを、波動のような微小変形によって非破壊的に知ることは出来ないであろうかという要求に対して、本研究によって得られた知見は一つの方角を示唆するものと思われる。実験装置の精度や容器の拡大、さらには各種コンクリートや各種の環境条件下での適用など多くの問題が課題として残されたが、これらについて今後一つ一つ解決して行く必要がある。

謝 辞

本研究を実施するにあたり、終始変らず御指導、御鞭撻下さり、また本論文をまとめる機会をお与えいただきました京都大学教授岡田清博士に心から感謝致します。同時に著者がコンクリートに興味を持ち始めて以来終始一貫して暖かい御指導、御鞭撻下さいました立命館大学教授明石外世樹博士に深く感謝します。

また研究途上において数々の御討議、御教示頂きその上お励まし下さいました神戸大学助教授藤井学博士、立命館大学教授児島孝之博士、京都大学助教授小林和夫博士に感謝します。

さらにしばしば有益な御助言、御討議をいただきました徳島大学助教授水口裕之博士、立命館大学助教授尼崎省二博士に謝意を表わすとともに、実験を遂行するにあたり御協力いただきました立命館大学土木材料研究室の高木宣章助手をはじめとする諸氏ならびに卒学生諸氏に対して感謝します。

最後に本論文を作成するにあたり、多大な御協力を得ました明石工業高等専門学校土木工学科の各位、ならびに御支援下さいました京都大学助手宮川豊章博士をはじめとする若手コンクリート研究会の諸氏に深く感謝の意を表します。また研究初期において大学院生として協力を頂き、また図面作成時において助力を頂いた葛目和広氏に深謝します。

